



**TUGAS AKHIR - TM 145502**

# **PENGARUH PENGURANGAN FRONTAL AREA UNTUK MENGURANGI GAYA DRAG PADA BODI MOBIL NOGOGENI DENGAN METODE SIMULASI NUMERIK**

**ACHMAD CHOIRUL ANAM  
NRP. 2113 030 037**

**Dosen Pembimbing I  
Dedy Zulhidayat Noor, S.T, M.T, Ph.D  
NIP. 19751206 200501 1 002**

**Dosen Pembimbing II  
Ir. Joko Sarsetyanto, M.T  
NIP. 1961060 2198701 1 001**

**PROGRAM DIPLOMA III TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016**



**FINAL PROJECT - TM 145502**

# **EFFECTS OF REDUCTION FRONTAL AREA FOR REDUCE DRAG FORCE ON THE NOGOGENI CAR'S BODY WITH NUMERICAL SIMULATION METHOD**

**ACHMAD CHOIRUL ANAM**  
**NRP. 2113 030 037**

**Consellor Lecture I**  
**Dedy Zulhidayat Noor, S.T, M.T, Ph.D**  
**NIP. 19751206 200501 1 002**

**Consellor Lecture II**  
**Ir. Joko Sarsetiyanto, M.T**  
**NIP. 1961060 2198701 1 001**

**DIPLOMA III MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT**  
**Faculty of Industry Technology**  
**Sepuluh Nopember Institute of Technology**  
**Surabaya 2016**

# **PENGARUH PENGURANGAN FRONTAL AREA UNTUK MENGURANGI GAYA DRAG PADA BODI MOBIL NOGOGENI DENGAN METODE SIMULASI NUMERIK**

## **TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Ahli Madya  
pada  
Bidang Studi Konversi Energi  
Program Studi Diploma III Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
SURABAYA

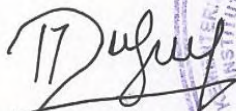
Oleh :

**ACHMAD CHOIRUL ANAM**  
NRP. 2113 030 037

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

  
**Dedy Zulkidayat N., ST, MT, PhD**  
NIP. 19751206 200501 1 002

  
**Ir. Joko Sarsetyanto, MT**  
NIP. 1961060 2198701 1 001

**SURABAYA  
JUNI 2016**

# **PENGARUH PENGURANGAN FRONTAL AREA UNTUK MENGURANGI GAYA DRAG PADA BODI MOBIL NOGOGENI DENGAN METODE SIMULASI NUMERIK**

**Nama Mahasiswa** : Achmad Choirul Anam  
**NRP** : 2113 030 037  
**Jurusan** : D3 Teknik Mesin FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing I** : Dedy Zulhidayat Noor, ST,  
MT, PhD  
**Dosen Pembimbing II** : Ir. Joko Sarsetyanto, M.T

## **Abstrak**

*Efisiensi sangat diperhatikan dalam produksi kendaraan. Untuk meningkatkan efisiensi, salah satunya dengan mengoptimalkan keaerodinamisan kendaraan. Aspek aerodinamis sangat diperlukan untuk mengurangi gaya drag pada suatu kendaraan saat melaju. Untuk itu, bodi Nogogeni ini dirancang khusus untuk mengoptimalkan aspek tersebut.*

*Untuk mengetahui gaya aerodinamika pada kendaraan dilakukan analisa karakteristik aliran di sekitar bodi mobil Nogogeni menggunakan fluent 6.3.26. Tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk mengetahui karakteristik fluida yang mengalir di seluruh bodi mobil Nogogeni, yang meliputi kontur tekanan, koefisien tekanan ( $C_P$ ), koefisien drag ( $C_D$ ) serta koefisien lift ( $C_L$ ) secara 3 dimensi melalui software fluent 6.3.26.*

*Dari hasil analisa aliran yang melintasi bodi mobil Nogogeni, koefisien drag ( $C_D$ ) yang diperoleh selama simulasi pada bodi mobil Nogogeni senilai 0.29322525. Sedangkan koefisien lift ( $C_L$ ) yang diperoleh selama simulasi pada bodi mobil Nogogeni senilai 0.17642594. Dari profil kecepatan di daerah belakang mobil, tampak bahwa pemisahan pada daerah upperside dimulai pada  $L = 2.04039$  m dan pada lowerside dimulai pada  $L = 2.17052$  m.*

**Kata kunci :** *kontur tekanan, pressure coefficient ( $C_P$ ), drag coefficient ( $C_D$ ), lift coefficient ( $C_L$ ) separasi, upperside, dan lowerside.*

# **EFFECT OF REDUCTION FRONTAL AREA FOR REDUCE DRAG FORCE ON THE NOGOGENI CAR'S BODY WITH NUMERICAL SIMULATION METHOD**

**Student name** : Achmad Choirul Anam  
**NRP** : 2113 030 037  
**Department** : D3 Teknik Mesin FTI-ITS  
**Final Project Adviser I** : Dedy Zulhidayat Noor, S.T,  
M.T, PhD  
**Final Project Adviser II** : Ir. Joko Sarsetyanto, M.T

## **Abstract**

*Efficiency is very concerned in vehicle production. To improve the efficiency, is by optimizing the vehicle aerodynamics. Aerodynamic aspect is necessary for reducing the drag force on a vehicle while driving. Therefore, the body of Nogogeni is specifically designed to optimize these aspects.*

*To determine the aerodynamic forces on the vehicle, had been analyzed the characteristics of the flow around the Nogogeni car's body using fluent 6.3.26. The purpose of this final projet is to find out the characteristics of the fluid that flowing around the Nogogeni car's body, which includes the contour of the pressure, the pressure coefficient ( $C_P$ ), the coefficient of drag ( $C_D$ ) and the coefficient of lift ( $C_L$ ) 3-dimensionally with fluent software 6.3.26.*

*From the analysis of the flow that crosses Nogogeni car's body, the coefficient of drag ( $C_D$ ) is obtained during the simulation on the Nogogeni car's body is 0.29322525. While the coefficient of lift ( $C_L$ ) is obtained during the simulation on the Nogogeni car's body is 0.17642594. From the velocity profile in the area behind the car, it appears that the separation on the upperside starts at  $L = 2.04039$  m and on the lowerside starts at  $L = 2.17052$  m.*

**Key words** : contours of pressure, pressure coefficient ( $C_P$ ), drag coefficient ( $C_D$ ), lift coefficient ( $C_L$ ) separation, upperside, and lowerside.

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>iv</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xiii</b>
<b>BAB I</b>	
PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan .....	2
1.4 Batasan Masalah .....	2
1.5 Manfaat Penulisan .....	3
1.6 Sistematika Penulisan .....	3
<b>BAB II</b>	
DASAR TEORI .....	5
2.1. Fluida .....	5
2.2. Sifat-sifat Fluida (udara) .....	7
2.3. Teori Aliran Eksternal .....	10
2.3.1. Terbentuknya <i>Boundary Layer</i> .....	11
2.3.2. Aliran <i>Nonviscous</i> dan <i>Viscous</i> .....	13
2.3.3. Separasi Aliran Pada <i>Boundary Layer</i> .....	14
2.4. Prinsip Dasar Aliran Angin pada Kendaraan .....	22
2.4.1. Pola Aliran di Sekitar Kendaraan .....	23
2.4.2. Pola Aliran di Permukaan Kendaraan .....	24
2.4.3. Pola Aliran di Bawah Kendaraan .....	25
2.4.4. Pola Aliran di Samping Kendaraan .....	26
2.5. Gaya Aerodinamika .....	27
2.5.1. Gaya <i>Drag</i> (Gaya Hambat) .....	27
2.5.2. Gaya <i>lift</i> (Gaya Hambat) .....	34
2.6. Pengaruh Bentuk Bodi .....	35
2.6.1. Koefisien Hambat berbagai Bentuk Kendaraan.....	36
2.6.2. Pengaruh Bentuk Komponen Bodi .....	38

2.7. Dinamika Aliran Fluida secara Komputasi ( <i>Computational Fluid Dynamics</i> ).....	44
2.7.1. Gambit ( <i>Geometry and Mesh Building Intelligent Toolkit</i> ) .....	45
2.7.2. <i>Fluent</i> .....	45
<b>BAB III</b>	
METODOLOGI PENELITIAN .....	51
3.1. <i>Design Criteria</i> .....	51
3.2. <i>Preprocessing</i> .....	51
3.2.1. Geometri Mobil <i>Nogogeni</i> .....	52
3.2.2. Domain Pemodelan .....	53
3.2.3. Meshing .....	53
3.2.4. Parameter Pemodelan .....	59
3.3. <i>Processing</i> atau <i>Solving</i> .....	61
3.4. <i>Postprocessing</i> .....	61
3.5. Alokasi Waktu Penelitian .....	61
3.6. Diagram Alir ( <i>flowchart</i> ) Metode Penelitian .....	62
<b>BAB IV</b>	
ANALISA DAN PEMBAHASAN .....	65
4.1. <i>Meshing's Grid Value</i> .....	65
4.2. <i>Iteration and Running Time</i> .....	67
4.3. Analisa Aliran 3 Dimensi.....	67
4.3.1 Analisa Grafik Distribusi $C_p$ .....	68
4.3.2 Visualisasi KONTur Tekanan .....	73
4.3.3 Visualisasi Vektor Kecepatan .....	75
4.3.4 Visualisasi <i>Pathline</i> Kecepatan .....	77
4.4. Analisa Gaya Aerodinamika .....	80
4.3.1. Perhitungan Gaya <i>Drag</i> .....	80
4.3.2. Perhitungan Gaya <i>lift</i> .....	83
<b>BAB V</b>	
PENUTUP	
5.1. Kesimpulan.....	87
5.2. Saran .....	87
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	
<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1.	$C_D$ dan $C_L$ <i>Nogogeni 3</i> .....	51
Tabel 3.2.	Dimensi bodi mobil <i>Nogogeni</i> .....	52
Tabel 3.3.	Alokasi waktu penelitian .....	62



*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Perbedaan sifat benda solid dengan fluida karena gaya geser .....	5
Gambar 2.2.	<i>Boundary layer</i> pada pelat datar .....	12
Gambar 2.3.	Teori terbentuknya <i>boundary layer</i> .....	13
Gambar 2.4.	Perbedaan antara fluida <i>viscous</i> dan ideal .....	14
Gambar 2.5.	<i>Boundary layer flow</i> dengan <i>pressure gradient</i> ..	15
Gambar 2.6.a	Aliran <i>incompressible</i> melewati bola .....	16
Gambar 2.6.b	Separasi aliran melewati benda <i>streamline</i> .....	16
Gambar 2.7.	Deskripsi skematik separasi <i>bubble</i> dan transisi lapisan batas .....	18
Gambar 2.8.	Distribusi tekanan pada separasi <i>bubble</i> .....	18
Gambar 2.9.	Pengukuran tekanan statis .....	19
Gambar 2.10.	Pengukuran tekanan stagnasi .....	21
Gambar 2.11.	Pengukuran tekanan stagnasi dan tekanan statis.	21
Gambar 2.12.	Pola aliran udara 2D pada kendaraan .....	22
Gambar 2.13.	Pola aliran udara di sekitar kendaraan .....	23
Gambar 2.14.	Pola aliran udara antara profil udara bebas dan permukaan.....	25
Gambar 2.15.	Pola aliran udara di bagian belakang kendaraan.	27
Gambar 2.16.	Hambatan bentuk pada kendaraan.....	28
Gambar 2.17.	<i>Control volume</i> untuk memperoleh drag pada bodi 2-Dimensi .....	29
Gambar 2.18.	Bentuk <i>trailing vortice</i> pada aliran melewati bodi mobil dengan <i>ground effect</i> sudut pandang 2D maupun 3D.....	34
Gambar 2.19.	Distribusi tekanan penyebab gaya angkat ( <i>lift force</i> ).....	35
Gambar 2.20.a	Tahap perencanaan bodi kendaraan.....	36
Gambar 2.20.b	Percobaan bodi kendaraan yang telah dilakukan .	36
Gambar 2.21.	Koefisien <i>drag</i> untuk silinder dan berbentuk dasar lainnya .....	37
Gambar 2.22.	Pengaruh modifikasi bentuk depan Audi 100 II terhadap gaya <i>drag</i> .....	38
Gambar 2.23.	Aliran separasi pada kap mobil .....	38

Gambar 2.24.	Grafik distribusi tekanan pada <i>forebody</i> mobil...	39
Gambar 2.25.	Separasi aliran pada kap .....	40
Gambar 2.26.	Penyatuan aliran pada kaca.....	40
Gambar 2.27.	Pengaruh konveksitas pada koefisien drag .....	41
Gambar 2.28.a	Tipikal <i>flow</i> yang terjadi pada bodi <i>streamline</i> ...	41
Gambar 2.28.b	Pengaruh kemiringan bagian belakang terhadap <i>drag</i> .....	42
Gambar 2.29.	Pengaruh kemiringan $\alpha$ terhadap $C_D$ dan $C_L$ .....	42
Gambar 2.30.	Pengaruh kekasaran daerah <i>underbody</i> terhadap koefisien <i>drag</i> .....	43
Gambar 2.31.	Blok diagram simulasi dengan CFD .....	44
Gambar 3.1.	<i>Geometri</i> 3D bodi mobil <i>Nogogeni</i> .....	52
Gambar 3.2.	Domain Pemodelan Bodi (3D-flow).....	53
Gambar 3.3.	Import geometri pada <i>Gambit</i> .....	54
Gambar 3.4.	Menu <i>meshing</i> .....	55
Gambar 3.5.	Hasil <i>meshing</i> 3D .....	55
Gambar 3.6.	Daerah batas <i>inlet &amp; outlet</i> .....	56
Gambar 3.7.	Menu pemilihan <i>mesh</i> yang didefinisikan sebagai fluida udara.....	57
Gambar 3.8.	Cara mengetahui kualitas <i>meshing</i> .....	58
Gambar 3.9.	meng- <i>export</i> ke <i>filetype .msh</i> .....	59
Gambar 3.10.	<i>Flowchart</i> metodologi penelitian.....	62
Gambar 4.1.	<i>Interval mesh</i> 0.01 .....	65
Gambar 4.2.	<i>Interval mesh</i> 0.05 .....	66
Gambar 4.3.	<i>Interval Mesh</i> 0.06.....	66
Gambar 4.4.	<i>Iterasi</i> .....	67
Gambar 4.5.	Visualisasi potongan searah sumbu x .....	68
Gambar 4.6.	Grafik distribusi $C_p$ 3D midspan.....	68
Gambar 4.7.	Grafik distribusi $C_p$ 3D pada $x=0.1$ m.....	69
Gambar 4.8.	Grafik distribusi $C_p$ 3D pada $x=0.2$ m.....	70
Gambar 4.9.	Grafik distribusi $C_p$ 3D pada $x=0.3$ m.....	70
Gambar 4.10.	Grafik distribusi $C_p$ 3D pada $x=0.4$ m.....	71
Gambar 4.11.	Grafik distribusi $C_p$ 3D pada $x=0.5$ m.....	71

Gambar 4.12.	Kontur tekanan statis tampak atas dan tampak bawah.....	73
Gambar 4.13.	Kontur tekanan statis tampak depan dan tampak belakang.....	74
Gambar 4.14.	Kontur tekanan statis tampak samping dan isometri .....	74
Gambar 4.15.	Vektor kecepatan pada <i>midspan</i> .....	75
Gambar 4.16.	Vektor kecepatan pada $x = 0.2$ m.....	76
Gambar 4.17.	Vektor kecepatan pada $z = 2.5$ m .....	76
Gambar 4.18.	<i>Pathline</i> aliran tampak samping .....	77
Gambar 4.19.	<i>Pathline</i> aliran tampak atas .....	78
Gambar 4.20.	<i>Pathline</i> aliran tampak bawah .....	78
Gambar 4.21.	<i>Pathline</i> aliran tampak depan .....	79
Gambar 4.22.	<i>Pathline</i> aliran tampak belakang .....	79
Gambar 4.23.	<i>Surface integrals</i> .....	80
Gambar 4.24.	<i>Reference Values</i> .....	81
Gambar 4.25.	<i>force report</i> pada <i>Fluent 6.3.26</i> .....	82
Gambar 4.26.	Hasil <i>drag force report</i> pada <i>Fluent 6.3.26</i> .....	82
Gambar 4.27.	<i>force report</i> pada <i>Fluent 6.3.26</i> .....	84
Gambar 4.28.	Hasil <i>lift force report</i> pada <i>Fluent 6.3.26</i> .....	84

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dengan didukung oleh perkembangan teknologi yang sangat pesat saat ini, kebutuhan manusia untuk memenuhi mobilisasi semakin mudah dan semakin meningkat. Tercatat bahwa penggunaan alat transportasi darat meningkat seiring dengan peningkatan mobilitas manusia. Berdasarkan data BPS pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor pada tahun 2014 mencapai 9,69% dari tahun sebelumnya. Dengan pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor yang begitu pesat maka diikuti juga dengan kebutuhan energi yang semakin meningkat. Hal ini menuntut para produsen kendaraan untuk dapat memproduksi suatu kendaraan yang memiliki tingkat efisiensi bahan bakar yang tinggi. Empat parameter penting yang mendukung peningkatan efisiensi bahan bakar adalah berat kendaraan, efisiensi mesin, cara mengemudi dan gaya hambat aerodinamikanya.

Dengan berkembangnya ilmu aerodinamika yang begitu pesat, memungkinkan untuk mendesain bentuk bodi kendaraan khususnya mobil, yang memiliki gaya hambat aerodinamika sekecil mungkin. Untuk konsep optimalisasi dari bentuk kendaraan tersebut, para peneliti biasa menggunakan konsep aliran aliran 3D yang melintasi suatu bodi. Salah satunya adalah analisa aliran melewati bodi tunggal yang sederhana maupun dengan menyertakan pengaruh dinding (side wall).

Hal tersebut yang melatar belakangi tugas akhir kami, dengan menganalisa aliran fluida yang melintasi bodi mobil *Nogogeni* dengan tampilan 3D. Fokus utama tertuju pada *leading edge* dan pengurangan *frontal area* pada bodi mobil *Nogogeni*. Diharapkan juga bisa mendapatkan analisa terhadap gaya *drag* dan *lift* serta struktur *wake* sehingga nilai  $C_D$ ,  $C_L$ , dan  $C_p$  dapat didapatkan dengan optimal. Dengan didapatkannya data yang optimal, pembuatan bentuk bodi kendaraan akan mempengaruhi gaya hambat aerodinamika pada bodi mobil guna peningkatan efisiensi konsumsi energi listrik.

## 1.2 Perumusan Masalah

Pada desain mobil *Nogogeni* memiliki geometri bagian depan (*leading edge*) yang cukup kecil diharapkan tidak terjadi multistagnation, dan sengaja bodi mobil *Nogogeni* ini didesain memiliki luas frontal yang lebih kecil dari sebelumnya. Serta kontur bodi yang dirancang *smooth* agar aliran fluida mengalir dengan baik mengikuti bentuk kontur bodi. Namun hanya saja bagian belakang (*rear end*) pada mobil *Nogogeni* ini yang kurang baik, hal ini akan menyebabkan aliran terpisah atau disebut separasi. Adanya separasi akan menghasilkan area bertekanan rendah di belakang bodi yang disebut *wake*.

Untuk mendapatkan bentuk bodi kendaraan yang lebih aerodinamis maka diperlukan karakteristik aliran fluida yang tampak lebih jelas pada software aplikasinya. Inilah permasalahan dari tugas akhir ini, bagaimana karakteristik aliran fluida yang melintasi bodi mobil *Nogogeni* dengan desain yang tertera dan sudah sesuai dengan regulasi *Kontes Mobil Hemat Energi* (KMHE). Tugas akhir ini pun menampilkan karakteristik aliran fluida dengan tampilan 3D dengan software *Fuent 6.3.26*, sehingga aliran yang melintasi bodi mobil terlihat jelas.

## 1.3 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik aliran fluida yang melintasi bodi mobil *Nogogeni*. Karakteristik aliran yang dimaksud antara lain :

1. Analisa distribusi koefisien tekanan ( $C_P$ ) pada kontur bodi mobil *Nogogeni*.
2. Analisa koefisien *drag* ( $C_D$ ) dan koefisien *lift* ( $C_L$ ) pada kontur bodi mobil *Nogogeni*.
3. Tampilan *contour*, *velocity vector* dan *pathlines* yang melintasi bodi mobil *Nogogeni*.
4. Sebagai referensi untuk membuat bodi mobil yang lebih baik selanjutnya.

## 1.4 Batasan Masalah

Untuk memperkecil ruang lingkup dan untuk memudahkan dalam analisis masalah dibutuhkan adanya pembatasan masalah.

Batasan masalah yang dipergunakan dalam penulisan tugas akhir ini antara lain:

1. Kondisi steady state serta aliran incompressible
2. Menggunakan perangkat lunak *Fluent 6.3.26*
3. Pengujian pada kondisi udara standart dengan menggunakan  $Re_L = 1,4130745 \times 10^6$
4. Analisa 3D menggunakan model turbulen *k-ε realizable*, boundary condition untuk inlet adalah *velocity inlet* dengan kecepatan aliran udara masuk sebesar 8.3 m/s dan untuk outlet adalah *outflow* dan bodi mobil *wall*.
5. Simulasi numerik dilakukan tanpa adanya roda, spion, atau aksesoris lain.
6. Pembahasan hanya pada *pressure coefficient* ( $C_P$ ), *drag coefficient* ( $C_D$ ), dan *lift coefficient* ( $C_L$ ).

## 1.5 Manfaat Penulisan

Manfaat yang dapat diambil dari penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui fenomena aliran secara fisis dari analisa aliran 3D disekitar bodi mobil *Nogogeni* melalui visualisasi aliran dengan perangkat lunak *Fluent 6.3.26*
2. Mampu memberikan sumbangsih nyata pada optimalisasi bodi kendaraan yang nantinya bisa digunakan sebagai rujukan pengembangan bodi mobil *Nogogeni*.

## 1.6 Sistematika Penulisan

### BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang latar belakang penulisan, perumusan masalah yang dipilih, tujuan penulisan, manfaat penulisan, batasan permasalahan dan sistematika penulisan.

### BAB II DASAR TEORI

Bab ini berisi tentang persamaan - persamaan yang mendasari perumusan masalah, teori *external flow*, gaya hambat, gaya angkat, pengaruh bentuk bodi, dan pengenalan *software FLUENT 6.3.26*.



### BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan langkah-langkah pemodelan melalui diagram alir, serta menguraikan pemodelan numerik yang dilakukan, mulai dari pembuatan geometri model uji, diskretisasi daerah analisa (*meshing*), pemodelan *FLUENT* 6.3.26.

### BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Bab ini menguraikan data yang diperoleh saat simulasi dilakukan yaitu berupa hasil *contour* tekanan, grafik *pressure coefficient* ( $C_p$ ), *drag coefficient* ( $C_D$ ), *lift coefficient* ( $C_L$ ), dan *pathline* yang dihasilkan serta pembahasan data yang diperoleh selama percobaan dilakukan.

### BAB V PENUTUP

Bab ini memaparkan kesimpulan yang diperoleh selama pembuatan tugas akhir ini yang merupakan ringkasan jawaban dari permasalahan yang dipilih. Dan berisikan saran-saran dari penulis.

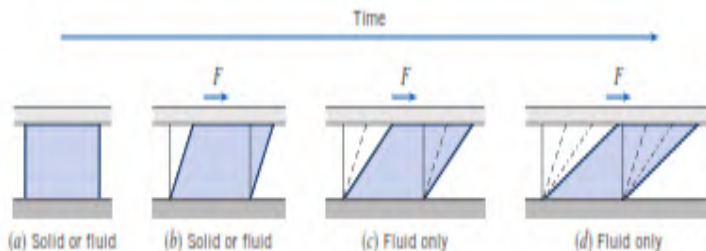
## BAB II DASAR TEORI

### 2.1 Fluida

Mekanika Fluida adalah cabang ilmu yang mempelajari mengenai zat fluida bergerak atau diam serta gaya akibat yang ditimbulkan oleh fluida tersebut pada batasnya. Sedangkan fluida sendiri merupakan zat yang akan mengalami deformasi secara terus menerus jika diberikan tegangan geser (tangensial) walaupun tegangan tersebut sangat kecil. Batas tersebut dapat berupa permukaan padat atau fluida lainnya.

Pembahasan tentang fluida yang bergerak yaitu dengan mengembangkan persamaan-persamaan dasar untuk penerapan teori analisis berdasarkan volume atur. Analisis didasarkan pada volume atur, karena yang pertama fluida sebagai media dapat mengalami distorsi dan deformasi secara terus menerus dan oleh karenanya sangat sulit sekali untuk mengidentifikasi suatu massa yang sama di setiap saat. Kedua, lebih sering berurusan dengan pengaruh dari gerakan fluida secara menyeluruh terhadap suatu peralatan maupun terhadap bangunan konstruksi tertentu.

Secara umum terdapat perbedaan antara fluida dengan benda solid, dimana benda solid tidak terjadi deformasi secara kontinyu selama gaya ( $F$ ) yang dikenakan lebih kecil dibanding batas elastisnya. Sedangkan fluida sendiri akan mengalami deformasi secara terus menerus jika diberikan tegangan geser (tangensial) secara kontinyu, seberapa kecil tegangan geser tersebut akan berpengaruh pada fluida. Berikut merupakan visualisasi sifat fluida jika dibandingkan dengan benda solid.



Gambar 2.1 Perbedaan sifat benda solid dengan fluida  
karena gaya geser  
(Fox And McDonald's, 2011)

Fluida memiliki sifat mengikuti perubahan bentuk wadah serta kemampuannya untuk mengalir menuju suatu tempat. Sifat ini dikarenakan salah satu dari sifat ketidakmampuan fluida melawan tegangan geser (*shear stress*) yang terjadi khususnya dalam kondisi *static equilibrium*.

Berdasarkan pergerakan partikelnya, aliran fluida dibedakan menjadi aliran *laminar* dan *turbulen*. Aliran *laminar* merupakan aliran fluida yang bergerak dengan kondisi lapisan-lapisan (*lamina-lamina*) yang membentuk garis-garis alir dan tidak berpotongan satu sama lain. Aliran *turbulen* adalah aliran fluida yang partikel-partikelnya bergerak secara acak dan tidak stabil dengan kecepatan berfluktuasi yang saling interaksi. Akibat dari hal itu maka garis alir antar partikel fluidanya akan saling berpotongan. Untuk menentukan aliran fluida tersebut aliran *laminar* ataupun aliran *turbulen* dapat dilihat dari nilai bilangan *reynold* -nya, pada *external flow* (aliran tersebut melewati suatu *contour body* yang berada pada aliran fluida tanpa batas), pada aliran *laminar* bilangan *reynold* -nya  $\leq 5 \times 10^5$ , dan pada aliran *turbulen* bilangan *reynold* -nya  $> 5 \times 10^5$ .

Kemudian aliran fluida diklasifikasikan berdasarkan perubahan terhadap waktu yaitu aliran tunak (*steady flow*) dan aliran tak tunak (*unsteady flow*). Aliran tunak (*steady flow*) terjadi jika kondisi fluida pada titik manapun tidak terjadi perubahan kecepatan terhadap waktu dengan jangka waktu yang tidak terbatas dan dapat dinotasikan dengan  $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$ , apabila pada kondisi kecepatan aliran berubah terhadap waktu  $\frac{\partial v}{\partial t} \neq 0$ , maka aliran tersebut digolongkan menjadi aliran tak tunak (*unsteady flow*).

Udara adalah suatu zat yang memiliki densitas dan viskositas. Densitas tergantung pada tekanan (P) dan temperatur (T). Pada umumnya kendaraan di jalan melaju dengan kecepatan dibawah sepertiga kecepatan suara. Pada batas kecepatan tersebut harga variasi tekanan dan temperatur dalam aliran dengan harga *freestream* sangat kecil, oleh karena itu perubahan pada densitas dapat diabaikan. Dengan demikian aliran fluida berupa udara yang

mengalir di sekeliling kendaraan dapat dikategorikan sebagai aliran fluida *incompressible*.

Properti lain dari udara adalah viskositas. Properti ini dikarenakan oleh gesekan molekuler antar partikel-partikel fluida. Gesekan ini berhubungan dengan fluks momentum, karena adanya *gradient* kecepatan. Untuk fluida *incompressible*, properti ini bergantung pada temperatur. Viskositas yang dimiliki fluida ini dapat menyebabkan terjadinya *friction drag* sehingga timbul gradien kecepatan pada dinding.

## 2.2 Sifat-sifat Fluida (udara)

Udara adalah fluida yang memiliki densitas dan viskositas. Densitas ( $\rho$ ) didefinisikan sebagai massa persatuan volume. Properti ini tergantung pada tekanan (P) dan temperatur (T). Kendaraan di jalan pada umumnya berjalan dengan kecepatan dibawah sepertiga kecepatan suara. Pada batas kecepatan tersebut harga variasi tekanan dan temperatur dalam aliran dengan harga *freestream* sangat kecil, oleh karena itu perubahan pada densitas dapat diabaikan. Dengan demikian aliran udara yang mengalir di sekeliling kendaraan dapat dikategorikan sebagai aliran fluida *incompressible*. Untuk kondisi standar,  $P = 1 \text{ atm}$  dan  $T = 288 \text{ K}$ , harga densitas atau  $\rho = 1,2250 \text{ kg/m}^3$ .

Properti lainnya dari udara adalah viskositas. Properti ini disebabkan oleh gesekan molekuler antara partikel-partikel fluida. Gesekan ini berhubungan dengan fluks momentum karena *gradient* kecepatan. Untuk fluida *incompressible*, properti ini bergantung pada temperatur. Pada kondisi standar viskositas  $\mu = 1,7894 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$  dan  $\nu = 1,4607 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ . Viskositas yang dimiliki fluida ini menyebabkan terjadinya *friction drag* sehingga timbul gradien kecepatan pada dinding.

### a) Densitas

Densitas ( $\rho$ ) atau kerapatan suatu zat adalah ukuran untuk konsentrasi zat tersebut yang dinyatakan dalam massa persatuan volume pada atmosfer bumi. Properti ini bergantung pada tekanan (P) dan temperatur (T). Densitas dinyatakan dalam tiga bentuk, yaitu:

### 1) *Densitas Massa*

Densitas massa merupakan perbandingan jumlah massa dengan jumlah volume. Densitas massa dapat dirumuskan dalam bentuk persamaan:

$$\rho = \frac{m}{V} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana:  $m$  = massa (kg)  
 $V$  = volume ( $m^3$ )  
 $\rho$  = massa jenis ( $kg/m^3$ )

Harga standarnya pada tekanan  $P = 1,01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  dengan temperatur 288,15 K sehingga densitas udara  $1,225 \text{ kg/m}^3$  dan untuk air adalah  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

### 2) *Berat Spesifik*

Didefinisikan sebagai gaya gravitasi terhadap massa yang terkandung dalam sebuah satuan volume zat.

$$\gamma = \rho \cdot g \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana:  $\gamma$  = berat spesifik ( $N/m^3$ )

Untuk ( $\gamma_{\text{udara}} = 12,07 \text{ N/m}^3$ ) dan ( $\gamma_{\text{air}} = 9,81 \times 10^3 \text{ N/m}^3$ ).

### 3) *Densitas Relatif (Specific Gravity)*

Densitas relatif disebut juga *specific gravity* (SG) yaitu perbandingan antara berat spesifik suatu zat dengan berat spesifik air. Karena kerapatan semua zat cair bergantung pada temperatur serta tekanan, maka temperatur zat cair yang dipertanyakan, serta temperatur air dijadikan acuan, harus dinyatakan untuk mendapatkan harga-harga gravitasi yang tepat.

$$SG = \frac{\gamma_{\text{zat}}}{\gamma_{\text{air}}} \dots\dots\dots (2.3)$$

## b) Viskositas

Viskositas merupakan pengukuran ketahanan fluida terhadap deformasi, sedangkan viskositas sendiri disebabkan oleh gesekan molekuler antara partikel - partikel fluida. Gesekan ini berhubungan dengan fluks momentum karena *gradient* kecepatan. Untuk fluida *incompressible*, properti ini bergantung pada temperatur. Viskositas dinyatakan dalam dua bentuk yaitu:

### 1) Viskositas Dinamis ( $\mu$ )

Viskositas dinamis merupakan perbandingan tegangan geser dengan laju perubahannya, besarnya viskositas air bervariasi dan dipengaruhi temperatur. Pada kondisi standar (temperatur kamar 26,5°C) besar viskositas dinamik adalah  $\mu_{\text{air}} = 8,6 \times 10^{-4} \text{ Ns/m}^2$  dan  $\mu_{\text{udara}} = 1,7894 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$

### 2) Viskositas Kinematik ( $\nu$ )

Merupakan perbandingan viskositas dinamik ( $\mu$ ) terhadap kerapatan ( $\rho$ ) :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \dots \dots \dots (2.4)$$

Viskositas kinematik muncul dalam banyak terapan, misalnya dalam bilangan *reynold* yang tanpa dimensi. Untuk  $\nu_{\text{air}}$  pada temperatur 26,5°C ialah  $8,6 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  dan  $\nu_{\text{udara}} 1,4607 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

## c) Bilangan Reynolds

Kondisi aliran *laminar* atau *turbulen* dapat dinyatakan dengan bilangan *Reynolds* untuk aliran *incompressible*. Jenis lapis batas pada aliran udara yang mengalir suatu obyek juga sangat ditentukan oleh bilangan *Reynolds* (*Re*). Hal ini dapat dijelaskan bahwa dalam lapis batas, gaya geseran gaya inersia sangat penting. Sedangkan bilangan *Reynolds* sendiri menggambarkan perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya geser yang mengkuantifikasikan hubungan kedua gaya tersebut dengan suatu kondisi aliran tertentu.

$$Re = \frac{\text{Gaya inersia}}{\text{Gaya geser}} \dots \dots \dots (2.5)$$

$$\text{dimana : Gaya Inersia} = \rho \times A = \rho U_{\infty}^2 . L^2$$

$$\text{Gaya Geser} = \tau \times A = \left( \frac{\mu U_{\infty}}{L} \right) L^2$$

Sehingga,

- Untuk aliran eksternal

$$Re = \frac{\rho U_{\infty}^2 L^2}{\left( \frac{\mu U_{\infty}}{L} \right) L^2} = \frac{\rho U_{\infty} L}{\mu} \dots \dots \dots (2.6)$$

dimana :  $\rho$  : Densitas fluida  
 $U_{\infty}$  : Kecepatan aliran *free stream* fluida  
 $L$  : Panjang karakteristik yang diukur pada medan aliran, dalam kasus ini digunakan diameter hidrolis, yaitu  $D_h$   
 $\mu$  : Viskositas dinamis fluida

- Untuk aliran internal

Diameter hidrolis ( $D_h$ ) digunakan untuk perhitungan saluran yang tidak berbentuk bundar. Diameter hidrolis dapat didefinisikan sebagai

$$D_h = \frac{4A}{P} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana :  $A$  = Luas penampang  
 $P$  = keliling penampang

Sehingga,

$$Re_h = \frac{\rho U_{\infty} D_h}{\mu} \dots \dots \dots (2.8)$$

### 2.3 Teori Aliran Eksternal

Suatu aliran disebut sebagai aliran eksternal (*external flow*) bila aliran tersebut melewati suatu *contour body* yang berada pada aliran fluida tanpa adanya batas yang mengurung. *Eksternal flow* sendiri adalah aliran fluida yang tidak dibatasi oleh permukaan

benda, namun seakan – akan permukaan bendalah yang dibatasi oleh aliran fluida tersebut.

### 2.3.1 Terbentuknya *Boundary Layer*

Suatu aliran disebut sebagai aliran eksternal (*external flow*) bila aliran tersebut melewati suatu *contour body* yang berada pada aliran fluida tanpa adanya batas yang mengurung. Sebagai contoh aliran eksternal adalah aliran fluida yang melewati sisi luar dari permukaan lengkung dan pelat datar (*semi-infinite flat plate*).

*Boundary layer* (lapis batas) merupakan lapisan tipis pada solid surface yang terbatas daerah sangat sempit dekat permukaan kontur dengan kecepatan fluida tidak uniform dikarenakan tegangan geser yang muncul akibat viskositas.

Dari penjelasan di atas, aliran melintasi suatu kontur diklasifikasikan menjadi dua daerah yaitu :

1. Daerah di dalam lapis batas (dekat permukaan kontur) dengan efek viskositas yang sangat berpengaruh (*viscous flow*).
2. Daerah di luar lapis batas dengan efek viskositas diabaikan (*nonviscous flow*).

Saat aliran fluida nyata dari *free stream* menuju suatu *contour body*, fluida akan mengalami perubahan kecepatan dari keadaan *uniform* ( $U_{\infty}$ ) ke kondisi aliran yang mempunyai distribusi kecepatan (*velocity distribution*). Hal ini terjadi karena pengaruh dari viskositas fluida dan *contour body* yang dilewatinya. Distribusi kecepatan diawali dari suatu titik di permukaan padat, dimana harga kecepataannya nol (*zero velocity*). Kemudian menjadi semakin besar ketika menjauhi permukaan kontur bodi. Pengaruh tegangan geser akan hilang pada posisi tertentu sehingga kecepatan fluida mencapai harga kecepatan fluida *non viscous* ( $u = 0,99 U_{\infty}$ ). Posisi tersebut merupakan batas daerah *viscous* dengan bagian *non viscous*. Jarak yang terukur dari permukaan padat arah normal hingga pada posisi tersebut disebut dengan tebal lapis batas (*boundary layer thickness*,  $\delta$ ). Dimana tebal lapis batas akan meningkat seiring dengan bertambah jarak lintasan yang dilalui oleh fluida.

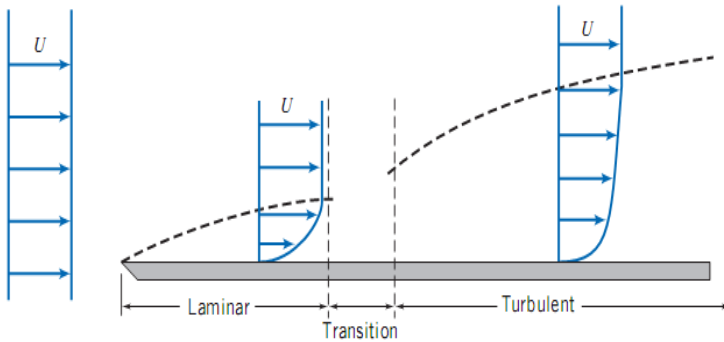
Secara umum terjadinya *Boundary Layer* disebabkan oleh karena fluida menabrak suatu kontur permukaan padat, karena



melewati kontur itulah terjadi perbedaan  $C_p$  di setiap titik yang menimbulkan  $C_D$  dan  $C_L$ .

Struktur *boundary layer flow* dapat digambarkan dengan mengamati gerakan partikel fluida. Saat mengalir diluar *boundary layer*, partikel mempertahankan bentuk asalnya sambil bergerak translasi namun tidak berotasi dan efek *viscosity* dapat diabaikan. Kondisi dengan *zero vorticity* ini dinamakan *irrotational*.

Gangguan mulai terjadi saat partikel memasuki *boundary layer* karena adanya *velocity gradient* dan efek *viscosity*. Akibatnya, selama bergerak translasi, partikel fluida juga bergerak rotasi. Dengan demikian *vorticity*-nya tidak sama dengan nol (*non zero vorticity*). Kondisi ini dinamakan *rotational*.



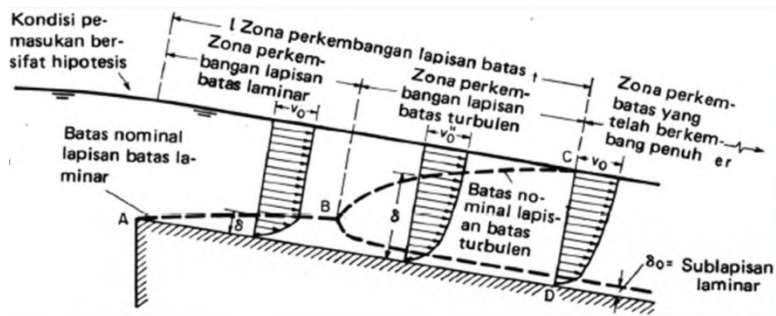
Gambar 2.2 *Boundary layer* pada pelat datar  
(Fox dan Mc. Donald, 2011)

Gambar di atas menunjukkan suatu pengembangan *boundary layer* sepanjang permukaan pelat. Pada daerah ini terjadi dua bentuk aliran. Awalnya aliran adalah *laminar* sepanjang jarak tertentu dari *leading edge*, kemudian terjadi suatu transisi aliran yang akhirnya akan berubah menjadi *turbulen*. Untuk aliran *incompressible* melewati *smooth flat plate* (*zero pressure gradient*), perubahan dari *laminar* ke *turbulen* dapat dipengaruhi oleh *Reynolds number*,

$$Re_x = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot x}{\mu} \dots\dots\dots (2.9)$$

(Barnard R.H, 1996)

Studi kasus terbentuknya boundary layer akan dijelaskan pada gambar berikut :



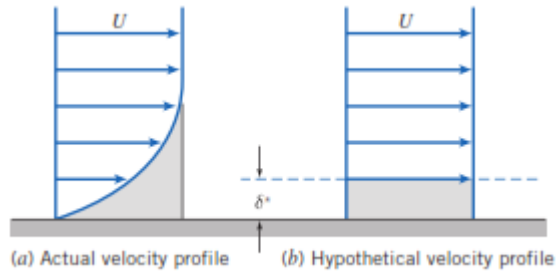
Gambar 2.3 Teori terbentuknya *boundary layer*  
(Sutantra N, 2001)

Aliran diawali dengan aliran *laminar* yang menghasilkan lapisan batas *laminar* berupa kurva AB dengan distribusi bersifat parabolis. Aliran yang dilanjutkan bersifat turbulen dengan titik perubahan pada titik B. Garis BC merupakan lapisan batas turbulen dengan distribusi bersifat logaritmis. *Sub lapisan laminar* akan terbentuk apabila permukaan saluran relatif halus dengan kecepatan rendah. Di dalam sub lapisan ini aliran bersifat *laminar* dan di atasnya merupakan zona peralihan dari sifat *laminar* ke *turbulen*. Lapisan batas *turbulen* CD dengan pola tertentu akan terbentuk apabila aliran seragam sepanjang saluran.

### 2.3.2 Aliran *Nonviscous* dan *Viscous*

Pada dasarnya aliran terbagi atas dua jenis yaitu aliran *viscous* dan aliran *non viscous*. Aliran *non viscous* bukan berarti bahwa aliran tidak mempunyai viskositas atau  $\mu = 0$ , tetapi dikarenakan setiap fluida pasti mempunyai viskositas tertentu. Aliran *non viscous* adalah aliran yang mempunyai gradien kecepatan mendekati nol atau tegangan gesernya mendekati nol. Sedangkan untuk aliran *viscous*, efek dari viskositasnya akan mengikuti tegangan geser antara partikel fluida dengan permukaan padat yang dilaluinya.

Pada aliran fluida ideal, semua partikel akan bergerak pada kecepatan yang sama, tetapi pada aliran *viscous* yang mengikutkan tegangan geser akan menjadikan profil kecepatan fluidanya akan menjadi tidak seragam seperti gambar 2.3 dibawah ini.

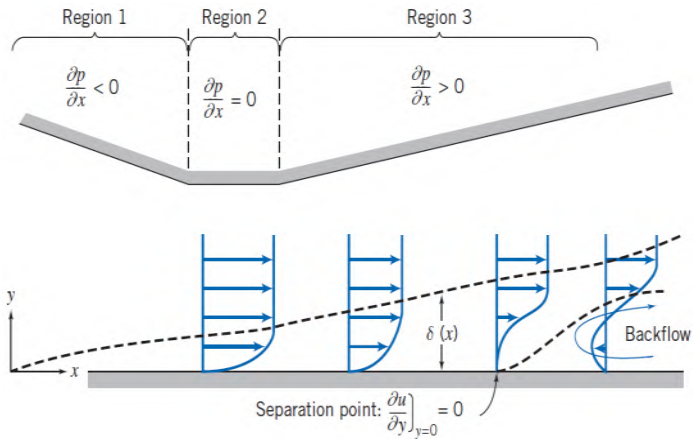


Gambar 2.4 Perbedaan antara fluida *viscous* dan ideal  
(Fox dan Mc. Donald, 2011)

Untuk aliran *viscous*, kecepatan fluida tepat berada diatas permukaan padat sama dengan nol. Semakin jauh dari permukaan padat, maka secara bertahap tegangan geser yang terjadi semakin berkurang. Sehingga berangsur-angsur juga kecepatan aliran akan menjadi semakin besar. Dan pada titik tertentu pengaruh tegangan geser terhadap aliran akan hilang, sehingga kecepatan aliran akan mencapai harga yang sama dengan aliran bebasnya.

### 2.3.3 Separasi Aliran Pada Boundary Layer

Dalam *boundary layer* akan ditemukan suatu fenomena yang disebut dengan separasi. Separasi ini mengakibatkan aliran yang terbalik arahnya dari aliran utama. Separasi merupakan peristiwa dimana aliran fluida terpisah dari permukaan benda. Proses separasi diawali dengan adanya aliran fluida yang terus menerus mengalami perubahan karena adanya gaya gesek. Akibat adanya gaya gesek tersebut, momentum aliran akan berkurang sampai suatu saat momentum alirannya sudah tidak bisa mengatasi hambatan sehingga aliran fluida akan terpisah dari permukaan benda, Pada titik dimana separasi terjadi, *gradient* tekanan pada permukaan bodi adalah nol dan aliran fluida di belakang titik separasi arahnya berlawanan dengan aliran utama.



Gambar 2.5 *Boundary layer flow* dengan *pressure gradient*.  
(Fox dan Mc. Donald, 2011)

Separasi sangat dipengaruhi oleh *gradient* tekanan sepanjang aliran, khususnya oleh *adverse pressure gradient*, yaitu tekanan yang semakin meningkat sejajar dengan arah aliran sepanjang permukaan benda kerja  $\frac{dP}{dx} > 0$ . Pada daerah *adverse pressure gradient*, aliran fluida akan mengalami hambatan selain karena adanya gaya gesek juga karena adanya kenaikan tekanan pada arah aliran fluida. Pada saat momentum fluida sudah tidak dapat melawan hambatan ini, aliran fluida tidak akan bisa bergerak lebih jauh sepanjang permukaan benda hingga aliran akan mengalami separasi.

#### a) **Separasi Aliran Dua-Dimensi (2D)**

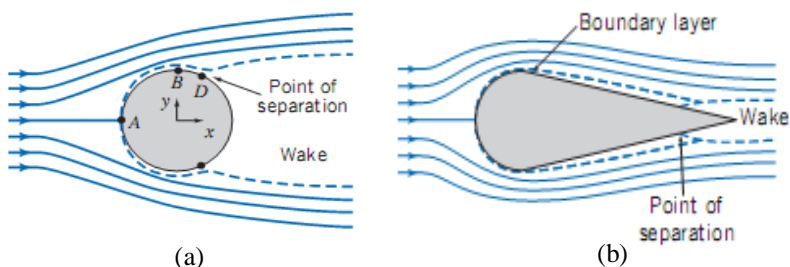
Separasi aliran fluida dua dimensi membawa kerugian pada aliran *laminar* atau aliran yang dalam kondisi paralel. Aliran *laminar* dua dimensi tersebut akan dirusak oleh efek friksi dan adanya *adverse pressure gradient* pada permukaan dari solid. Separasi ini dimulai pada titik dimana perubahan kecepatan ke arah  $y$  sama dengan nol. Hal ini dapat dilihat dalam gambar 2.4.

*Vorticity* yang terjadi pada titik ini sangat besar sehingga momentum yang ada mulai dirusak *vorticity* tersebut dan terjadilah *vortex*. *Vortex* merupakan daerah di belakang daerah separasi. Ada

dua daerah yang ada pada daerah separasi ini yaitu daerah *laminar* yang terseparasi dan daerah resirkulasi. Daerah separasi tersebut semakin ke belakang semakin besar sampai pada suatu titik dimana alirannya sudah kembali ke kondisi paralel (alirannya sudah paralel), dan hal ini dikenal dengan *reattachment*. Pada titik ini momentum yang terdapat di dalam aliran fluida ini sudah dapat mengatasi *adverse pressure gradient* yang terjadi sebelumnya atau dengan kata lain momentumnya sudah mendapatkan tambahan kembali dari kondisi *freestream*-nya. Namun aliran ini sudah berubah menjadi aliran yang *turbulen* karena penambahan momentum yang ada tersebut melebihi dari kondisi *laminar*-nya. Aliran yang *turbulen* ini baik sekali untuk mengatasi *adverse pressure gradient*.

Kecepatan yang mengelilingi silinder meningkat sampai suatu titik maksimum D dan kemudian berkurang saat bergerak lebih jauh ke belakang dari titik D. Titik D disebut titik separasi (*separation point*), dimana partikel fluida mendorong objek dan menyebabkan terjadinya *wake*.

Pada suatu aliran *inviscid* peningkatan distribusi kecepatan dihubungkan oleh pengurangan distribusi tekanan pada aliran yang melintasi profil silinder tersebut. Sehingga pada suatu aliran *incompressible inviscid flow* yang melintasi silinder, distribusi tekanan disepanjang permukaan dari silinder berkurang saat berjalan dari A-D dan akan meningkat lagi saat bergerak dari D-E. Pada aliran *viscous steady incompressible* bentuk aliran akan tampak seperti gambar berikut ini :



Gambar 2.6 (a) Aliran *incompressible* melewati bola (*sphere*)  
(b) Separasi aliran melewati benda *streamline*  
(Fox dan Mc. Donald, 2011)

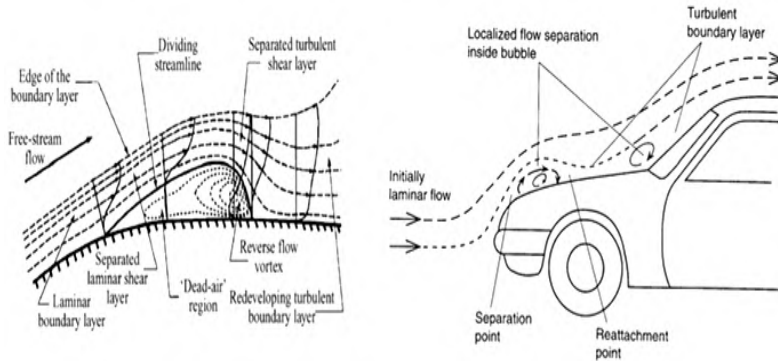
Pada gambar 2.6 (b) bagaimana bentuk streamline bekerja. Gaya drag pada kebanyakan aerodinamik karena tekanan rendah pada *wake*. Jika *wake* dapat dikurangi atau dihapus, drag akan dapat banyak dikurangi. Jika kita membuat bola menyerupai bentuk air mata pada gambar 2.6 (b) *streamline* terbuka, dan tekanan akan meningkat dengan pelan, seperti memperpanjang aliran sehingga partikel aliran tidak didorong untuk memisahkan dari objek sampai mencapai akhir dari objek. *Wake* yang terjadi lebih kecil, sehingga mengurangi tekanan drag. Hanya satu aspek negatif dari *streamline* ini adalah luas permukaan total dengan gesekan terjadi lebih besar, sehingga drag karena gesekan akan sedikit berkurang.

Namun pada aliran setelah titik B tekanan akan meningkat dalam arah aliran sehingga pada beberapa titik momentum aliran dari fluida didalam *boundary layer* tidak cukup untuk membawa elemen jauh kedalam daerah peningkatan tekanan sehingga aliran fluida yang berdekatan pada permukaan akan mengalami pemecahan ke arah balik dan aliran akan terseparasi dari permukaan. Hasil dari separasi *boundary layer* pada daerah *relative* tekanan rendah dibelakang body yang mana momentum alirannya tidak mencukupi disebut *wake*.

#### **b) Separasi Bubble**

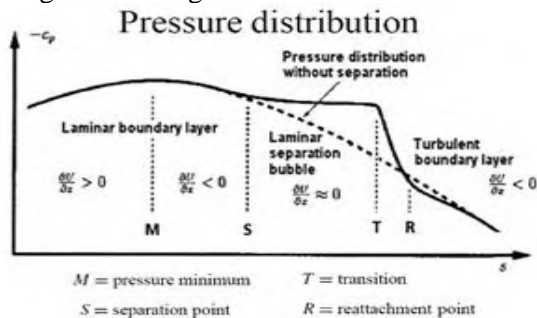
Separasi *bubble* adalah separasi yang dilanjutkan dengan penyentuhan kembali fluida yang telah terseparasi ke *solid body*. Seperti terlihat pada gambar 2.7.

Separasi *bubble* dimulai dengan terpisahnya *boundary layer laminar* dari dinding. Tepi *boundary layer* terangkat dan *shear layer laminar* yang terseparasi akan berinteraksi dengan *freestream*. Aliran mendapat injeksi energi dari *freestream* yang kemudian memaksa *shear layer* untuk *attach* kembali ke *solid body*. Setelah mencapai titik *reattachment*, aliran diperlambat lagi karena adanya gesekan dan *adverse pressure gradient* yang lebih kuat, sehingga terjadi separasi *massive*.



Gambar 2.7 Deskripsi skematik separasi *bubble* dan transisi lapisanbatas  
(Bao, F. and Dallmann, 2003)

Daerah di bawah *shear layer laminar*, yang merupakan *downstream* dari titik separasi (dimulai dari titik dimana *dividing streamline* meninggalkan dinding), adalah daerah tertutup berisi *recirculating flow* dengan kecepatan lambat. Sedangkan fluida yang di dekat dinding seolah-olah diam sehingga disebut *dead-air region*. Selain itu nilai *wall pressure* dalam daerah aliran yang terseparasi adalah konstan kecuali daerah belakang *bubble* dimana terjadi osilasi tekanan yang kuat. Hal ini dikarenakan pusat *recirculating flow* berada dekat bagian belakang *bubble*.



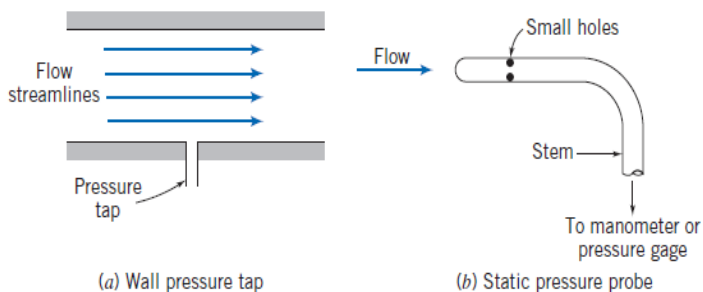
Gambar 2.8 Distribusi tekanan pada separasi *bubble*  
(Bao, F. and Dallmann, 2003)

Dari distribusi tekanan pada gambar 2.8, tampak bahwa tekanan statis cenderung bernilai konstan selama *downstream* dari titik separasi. Hal ini dikarenakan kecepatan partikel fluida di daerah *separated flow* sangat lambat. Tekanan kembali meningkat setelah separasi *bubble*.

### c) Tekanan Statis, Stagnasi, dan Dinamis

Tekanan  $P$  yang digunakan pada persamaan Bernoulli adalah tekanan thermodinamis atau lebih dikenal dengan tekanan statis. Tekanan statis adalah tekanan yang diukur oleh alat ukur yang bergerak bersama-sama aliran dengan kecepatan yang sama. Bagaimanapun juga cara pengukuran yang demikian sangat sulit dilakukan. Oleh karena itu perlu ada cara yang praktis untuk mengukurnya.

Fluida yang mengalir lurus akan mempunyai *streamlines* lurus pula dan tidak mempunyai variasi tekanan ke arah normal dari aliran *streamlines* tersebut. Kenyataan ini memungkinkan untuk melakukan pengukuran tekanan statis dengan menggunakan *wall pressure tap* yang ditempatkan di daerah dimana aliran *streamlines* lurus, seperti yang terlihat pada gambar 2.9 dibawah ini.



Gambar 2.9 Pengukuran tekanan statis  
(Fox dan Mc. Donald, 2011)

*Pressure tap* adalah sebuah lubang kecil yang dibuat pada dinding di mana axisnya tegak lurus terhadap permukaan dinding. Apabila lubang tersebut tegak lurus terhadap dinding suatu saluran dan bebas dari kotoran, akurasi pengukuran tekanan statis akan dapat



diperoleh dengan menghubungkan *pressure tap* dengan suatu alat ukur yang sesuai. Apabila fluida mengalir jauh dari dinding atau bila *streamlines*-nya berbentuk kurva, akurasi pengukuran tekanan statis dapat diperoleh dengan menggunakan *pressure probe*, seperti yang terlihat pada gambar 2.9. Tekanan stagnasi adalah tekanan yang dapat diukur bila aliran diperlambat sampai kecepatannya sama dengan nol dengan proses tanpa gesekan. Pada aliran *incompressible*, persamaan Bernoulli dapat digunakan sehubungan dengan perubahan kecepatan dan tekanan sepanjang *streamlines*. Dengan mengabaikan diferensial elevasi, persamaan Bernoulli menjadi :

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = \text{konstan}$$

Bila tekanan statis  $p$  pada suatu titik dalam suatu aliran dimana kecepatannya adalah  $V$ , maka tekanan stagnasi  $p_o$ , dimana kecepatan stagnasi  $V_o$  adalah nol, maka :

$$\frac{p_o}{\rho} + \frac{V_o^2}{2} = \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2}$$

dimana  $V_o = 0$ , sehingga :

$$\frac{p_o}{\rho} = \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2}$$

atau,

$$p_o = p + \frac{1}{2} \rho V^2$$

Persamaan di atas adalah kalimat matematis dari definisi tekanan stagnasi, yang valid untuk aliran *incompressible*. Bentuk  $\frac{1}{2} \rho V^2$  umumnya disebut tekanan dinamis. Jadi persamaan tekanan

dinamis adalah :

$$\frac{1}{2} \rho V^2 = p_o - p$$

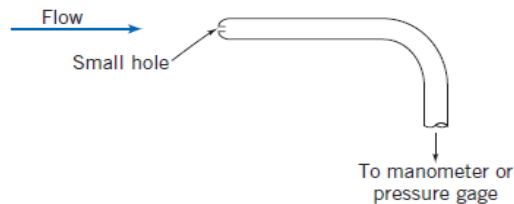
dan kecepatannya adalah :

$$V = \sqrt{\frac{2(p_o - p)}{\rho}} \dots \dots \dots (2.10)$$

(Fox dan Mc. Donald, 2011)

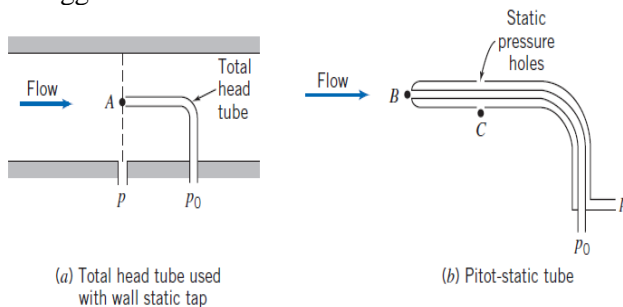
Jadi, bila tekanan stagnasi dan tekanan statis diukur pada suatu titik, maka persamaan kecepatan diatas akan menghasilkan kecepatan aliran lokal.

Tekanan stagnasi dapat diukur dengan menggunakan sebuah *probe* dimana lubangnya langsung berhadapan dengan aliran seperti terlihat pada gambar 2.10. *Probe* ini dikenal dengan nama *stagnation pressure probe* atau *pitot tube*. Daerah pengukurannya juga harus sejajar dengan arah aliran lokal.



Gambar 2.10 Pengukuran tekanan stagnasi  
(Fox dan Mc. Donald, 2011)

Pada gambar 2.10 terlihat bahwa tekanan statis yang sejajar dengan garis di titik A dapat dibaca dari *wall static pressure tap*. Sedangkan tekanan stagnasi dapat diukur langsung pada titik A dengan menggunakan *total head tube*.



Gambar 2.11 Pengukuran Tekanan Stagnasi dan Tekanan Statis  
(Fox dan Mc. Donald, 2011)

Terkadang dua buah *probe* dapat dikombinasikan seperti pada *pitot-static tube* (gambar 2.11 b). Tabung bagian dalam digunakan

untuk mengukur tekanan stagnasi pada titik B, sedangkan tekanan statis pada titik C dibaca melalui lubang-lubang kecil pada tabung bagian luar. Pada daerah aliran dimana variasi tekanan statis dalam arah *streamwise*-nya kecil, *pitot-static tube* dapat digunakan untuk mencari kecepatan pada titik B, dengan menggunakan persamaan kecepatan di atas dan mengasumsikan  $p_b = p_c$

Perbedaan antara tekanan lokal statik pada setiap titik dalam aliran dengan tekanan statik pada *freestream* bergantung langsung dengan tekanan dinamik pada *freestream*, dan perbandingan ini yang disebut dengan koefisien tekanan atau *pressure coefficient* ( $C_p$ ).

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} \dots\dots\dots (2.11)$$

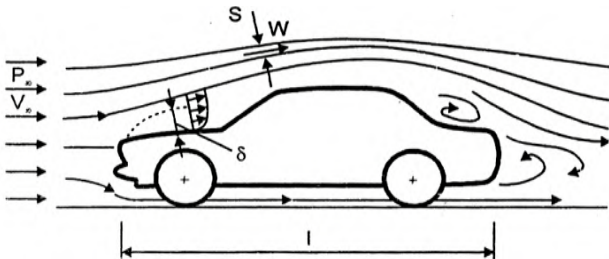
(Barnard R.H, 1996)

Dimana :      $P$  = tekanan *local static* atau tekanan pada kontur  
                    $P_\infty$  = tekanan statik *freestream*  
                    $V_\infty$  = kecepatan *freestream*

**2.4 Prinsip Dasar Aliran Angin pada Kendaraan**

Secara umum fenomena aliran pada kendaraan dapat dikategorikan dalam 2 aliran yaitu aliran *external* dan aliran *internal*. Aliran *external* adalah aliran udara yang terletak di sekitar kendaraan dan aliran udara yang masuk ke dalam bagian mesin. Aliran *internal* adalah aliran yang terletak dalam bagian permesinan misalnya proses aliran fluida di dalam mesin dan sistem transmisi kendaraan.

Pola aliran di sekitar bodi kendaraan dapat dilihat pada gambar 2.12. Pada gambar ini menggambarkan terjadinya gaya dan momen aerodinamis pada kendaraan yang nantinya juga akan berpengaruh terhadap gaya hambat (*drag*) dari kendaraan.

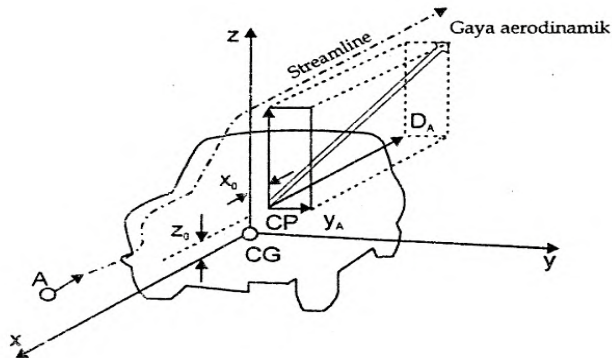


Gambar 2.12 Pola aliran udara 2D pada kendaraan  
(Sutantra N, 2001)

#### 2.4.1 Pola Aliran di Sekitar Kendaraan

Kendaraan bermotor yang sedang berjalan mempunyai dua bidang kontak yaitu terhadap udara dan terhadap jalan/tanah. Kendaraan yang berjalan akan bergerak relatif terhadap jalan/tanah. Apabila udara diam yaitu pada keadaan tidak ada angin maka kendaraan akan memiliki kecepatan relatif yang sama terhadap jalan/tanah dan juga terhadap udara. Sedangkan jika ada aliran udara relatif terhadap tanah yaitu ada angin yang berhembus, maka kendaraan akan memiliki perbedaan kecepatan relatif terhadap jalan/tanah dan terhadap udara.

Di dalam pendekatan terhadap aerodinamika kendaraan, diasumsikan tidak ada angin yang berhembus (atmosfir sebagai kesatuan tanah) dan kecepatan kendaraan dapat dianggap konstan. Pada dasarnya semua fenomena aerodinamis yang terjadi pada kendaraan disebabkan adanya gerakan relatif dari udara di sepanjang bentuk bodi kendaraan.



Gambar 2.13 Pola aliran udara disekitar kendaraan  
(Sutantra N, 2001)

Pada gambar 2.13 dapat diketahui jika pada waktu itu tidak ada angin yang berhembus dan diasumsikan kecepatan mobil

konstan, maka partikel udara berikutnya juga akan melewati titik A tersebut dan mengikuti alur lintasan yang sama. Dengan demikian dapat didefinisikan *streamline* adalah garis-garis yang dibuat di dalam medan kecepatan sehingga setiap saat garis-garis tersebut akan searah dengan aliran disetiap titik didalam medan aliran tersebut.

*Streamline* pada tempat yang jauh dari kendaraan akan sejajar dan tidak terganggu. Sedangkan *streamline* di sekitar kendaraan akan mempunyai pola aliran yang sangat kompleks dikarenakan bentuk kendaraan itu sendiri yang kompleks sehingga di sekeliling kendaraan akan terdapat daerah gangguan aliran udara. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa gerakan dari partikel yang terletak jauh dari kendaraan akan memiliki kecepatan relatif yang sama dengan kecepatan kendaraan. Sedangkan pada daerah gangguan di sekeliling kendaraan, maka kecepatan relatif dari partikel sangat bervariasi, lebih besar atau lebih kecil dari kecepatan aktual kendaraan.

#### **2.4.2 Pola Aliran di Permukaan Kendaraan**

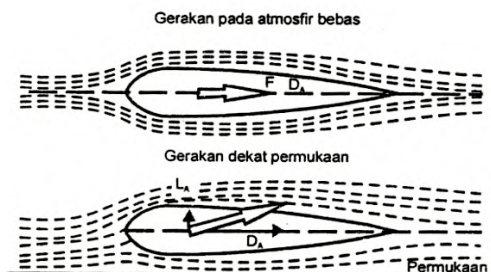
Pola aliran di permukaan kendaraan akan menyebabkan efek viskositas. Karena adanya efek viskositas dari udara maka akan menyebabkan timbulnya *boundary layer* di sepanjang permukaan kendaraan sehingga timbul *gradient* kecepatan pada permukaan kendaraan. Adanya *gradient* kecepatan menyebabkan kecepatan aliran udara pada permukaan kendaraan sangat bervariasi tergantung dari bentuk dan jenis kendaraan tersebut. Dengan adanya *gradient* kecepatan maka akan timbul distribusi tekanan di sepanjang permukaan kendaraan.

Bagian depan kendaraan merupakan daerah tekanan positif. Hal ini disebabkan adanya efek tumbukan aliran udara pada bagian depan sehingga laju aliran lebih lambat dan mengakibatkan daerah tekanan positif. Pada posisi stagnasi (nilai  $C_p = 1$ ) yang merupakan daerah tekanan tertinggi dimana energi kinetik aliran udara diubah menjadi energi potensial, kecepatan aliran nol sehingga tekanannya tertinggi. Dari titik stagnasi, aliran udara akan mengalir kembali sehingga akan terjadi penurunan tekanan pada bodi permukaan kendaraan. Pada permukaan di bagian lekukan pada kap mesin kendaraan akan mengalami penurunan kecepatan aliran udara.

Pada pola aliran di permukaan kendaraan akan mengakibatkan efek separasi yang akan menaikkan tekanan pada kendaraan sehingga gaya hambat aerodinamis (*drag*) yang ditimbulkan akan lebih besar.

### 2.4.3 Pola Aliran di Bawah Kendaraan

Pola aliran udara di sekitar suatu profil yang bergerak pada atmosfer bebas berbeda dengan suatu profil yang bergerak dekat tanah (*ground*).



Gambar 2.14 Pola aliran udara antara profil udara bebas dan permukaan  
(Sutantra N, 2001)

Suatu profil yang bergerak pada atmosfer bebas akan mempunyai pola aliran udara yang simetris sehingga mempunyai distribusi tekanan yang simetris antara bagian atas dan bawah profil dan akibatnya tidak akan timbul gaya *lift*. Pada profil yang bergerak dekat dengan tanah akan menimbulkan pola aliran yang tidak simetris dengan sumbu profil sehingga akan menimbulkan gaya aerodinamis. Gaya aerodinamis bekerja miring terhadap sumbu kendaraan dan dapat timbul gaya *drag* dan *lift*. Sehingga dapat dikatakan tekanan yang dihasilkan pada bawah kendaraan lebih besar daripada permukaan atas kendaraan.

Pada permukaan kendaraan yang bergerak dekat dengan tanah, permukaan atas mobil memiliki kelengkungan lebih besar daripada permukaan bawah, sebagai akibatnya jarak yang ditempuh aliran udara pada permukaan atas lebih panjang daripada permukaan bawah kendaraan pada periode waktu yang sama.

Menurut hukum kontinuitas, semakin dekat suatu profil bergerak diatas tanah kecepatan aliran udara di antara profil dan tanah akan semakin tinggi karena adanya pengecilan luasan, sehingga tekanan yang dihasilkan akan semakin mengecil. Tetapi pada kondisi real, dimana aliran udara memiliki viskositas maka pada jarak *ground clearance* yang sangat kecil akan berbentuk *boundary layer* pada tanah. *Boundary layer* tersebut akan mengadakan interaksi satu sama lain sehingga akan memperlambat kecepatan aliran tekanan yang dihasilkan semakin besar.

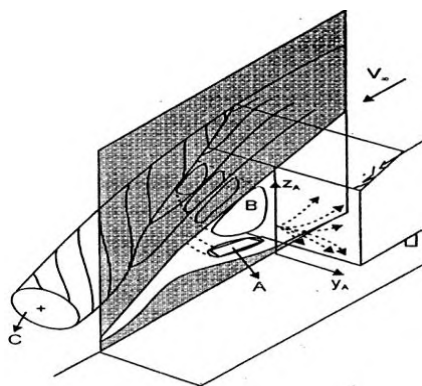
Pada kendaraan, kecepatan aliran udara pada bagian bawah juga dipengaruhi oleh suatu profil mesin bagian bawah dan kekasaran permukaan. Adanya berbagai tonjolan profil mesin pada bagian bawah akan menyebabkan separasi aliran sehingga kecepatan aliran rendah dan tekanan semakin besar.

#### **2.4.4 Pola Aliran di Samping Kendaraan**

Kecepatan aliran udara di sepanjang bagian samping kendaraan rata-rata lebih cepat dibandingkan bagian bawah kendaraan. Hal ini menyebabkan adanya gerakan aliran udara dari bagian bawah kendaraan menuju bagian samping kendaraan dan pada kecepatan tinggi akan membentuk rotasi berbentuk pusaran atau *vortex*. Perpindahan aliran udara ini disebabkan perbedaan tekanan antara bagian bawah bodi dengan bagian samping bodi. *Vortex* ini terjadi di sepanjang bodi mobil (*attached vortex*) dan di bagian belakang mobil (*trailing vortex*). Terjadinya *vortex* ini sangat merugikan, karena akan menimbulkan tekanan rendah. Vortek tervesar terjadi di bagian belakang bodi yang disebut *wake*, *vortex* ini menyebabkan tekan rendah dan mengakibatkan perbedaan tekanan antara bagian depan bodi dengan bagian belakang bodi yang menyebabkan terjadinya gaya dorong ke belakang yang merugikan. Tekanan terendah terjadi jika terjadi *vortex* yang kecil seperti pada *bubble separation* tekanan yang dihasilkan sangat rendah, jauh lebih rendah daripada *massive separation* yang terjadi di daerah *wake*. Untuk menghindari adanya *vortex* maka dibuatlah bodi yang *streamline* dan tidak ada sudut belokan yang tajam untuk menghindari *bubble separation* maupun *massive separation*.

Adanya perbedaan tekanan pada bagian pilar belakang yaitu antara bagian samping kendaraan dengan kemiringan kaca belakang

akan menimbulkan *vortex*. Dengan demikian pada bagian belakang akan terjadi suatu pola aliran udara yang sangat kompleks dimana terjadi penyatuan *attached vortex* dan *vortex* pilar sehingga dibelakang kendaraan akan terbentuk aliran *turbulen*. Formasi *trailing vortex* pada bagian belakang kendaraan dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.15 Pola aliran udara di bagian belakang kendaraan  
(Sutantra N, 2001)

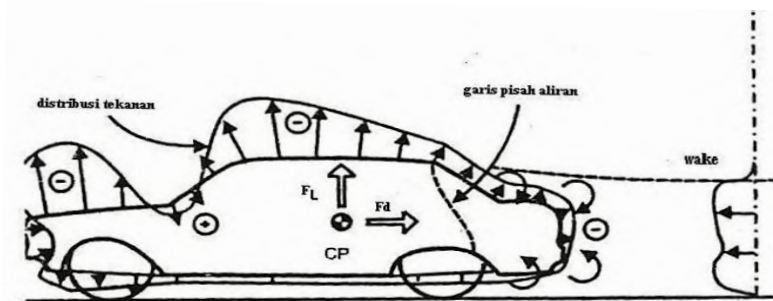
## 2.5 Gaya Aerodinamika

Merupakan gaya-gaya yang diterima oleh satu bodi akibat fluida yang mengalir . Dengan adanya fluida ang mengalir maka mendapat gaya tekan dan geser. Akibatnya gaya - gaya tersebut membentuk resultan gaya yang disebut gaya aerodinamika. Untuk resultan yang searah dengan aliran disebut gaya drag, sedangkan gaya yang tegak lurus aliran adalah gaya lift.

### 2.5.1 Gaya Drag (Gaya Hambat)

Gaya hambat (*drag*) adalah gaya yang bekerja dalam arah horizontal (pararel terhadap aliran) dan berlawanan arah dengan arah gerak maju kendaraan. Besarnya gaya hambat (*drag*) untuk setiap bentuk kendaraan berbeda satu dengan yang lainnya, dan ini tergantung pada faktor koefisien *drag* atau  $C_D$ . selain itu juga dipengaruhi oleh luasan frontal dari kendaraan, dan tekanan dinamik.





Gambar 2.16 Hambatan bentuk pada kendaraan  
(Sutantra N, 2001)

Adapun perumusan gaya hambat (*drag*) pada kendaraan adalah sebagai berikut:

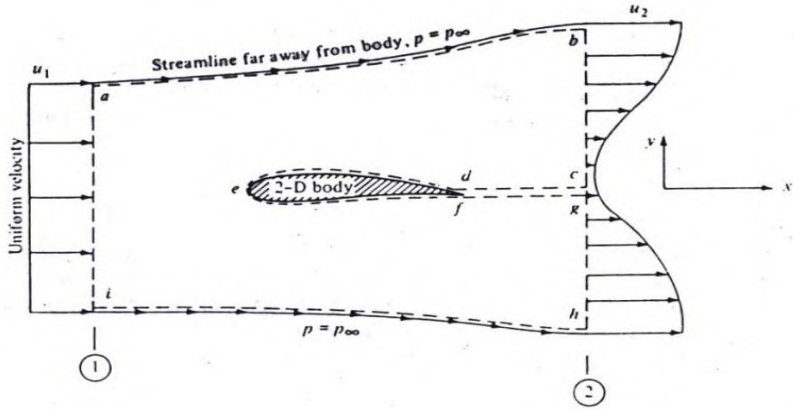
$$F_D = \frac{1}{2} C_d \cdot \rho \cdot V_a^2 \cdot A_f \dots\dots\dots (2.12)$$

(Sutantra N, 2001)

Dimana:     A=Luas frontal  
              ρ=Densitas udara  
              V=Kecepatan kendaraan relative terhadap udara

Hubungan antara koefisien *drag* ( $C_D$ ) dan luas frontal kendaraan (A) disebut dengan faktor bentuk atau *shape factor*. Pertimbangan untuk sebuah bodi dua dimensi di dalam suatu aliran, seperti pada gambar 2.16. *control volume* digambarkan di sekeliling bodi yang ditunjukkan dengan garis putus-putus. Control volume dibatasi oleh.

1. *Upper* dan *lower streamline* yang letaknya jauh di atas dan di bawah bodi (ab dan hi secara berturut-turut)
2. Garis yang tegak lurus terhadap kecepatan aliran yang letaknya jauh di muka (di depan) dan di belakang bodi (ai dan bh secara berturut-turut)
3. Potongan yang mengelilingi dan membungkus permukaan bodi (cdfg).



Gambar 2.17 *Control volume* untuk memperoleh drag pada bodi 2-Dimensi  
(Anderson John D. JR, 1988)

Keseluruhan *control volume* adalah garis yang terhubung antara titik *abcdefghia*. Lebar *control volume* pada *z-direction* (tegak lurus terhadap halaman ini) secara kesatuan. *Station 1* dan *2* adalah *inflow* dan *outflow station* secara berurutan.

Asumsikan kontur *abhi* cukup jauh dari bodi seperti halnya tekanan yang dimana pun besarnya sama dengan yang ada pada *abhi* dan jumlahkan terhadap tekanan *freestream*  $p = p_{\infty}$ . Asumsikan juga bahwa *velocity inflow*  $u_1$  adalah aliran *uniform* yang melewati *ai*. *Velocity outflow*  $u_2$  bukan aliran *uniform*, aliran ini melewati *bh*, karena adanya bodi membuat terbentuknya *wake* pada *outflow station*. Bagaimanapun asumsikan bahwa keduanya  $u_1$  dan  $u_2$  berada pada *x-direction* karena itu  $u_1 = \text{konstan}$  dan  $u_2 = f(y)$ .

Keseluruhan dari gaya-gaya permukaan pada *control volume*, berasal dari dua kontribusi yaitu:

1. Distribusi tekanan pada permukaan *abhi*.

$$- \iint_{abhi} p \cdot ds$$

2. Gaya permukaan pada *def* yang muncul karena keberadaan bodi.

Dari kedua pandangan di atas, maka total gaya permukaan yang bekerja pada keseluruhan *control volume* adalah,

$$\text{surface force} = - \iiint_{abhi} p.dS - R' \dots\dots\dots (2.13)$$

Persamaan tangan kanan adalah gaya yang bekerja pada aliran yang bergerak melalui *control volume*. Untuk *control volume* pada gambar 2.18, gaya ini secara sederhana ditunjukkan oleh persamaan (2.13). Oleh karena persamaan tangan kanan diterapkan terhadap persamaan (2.13), sehingga

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho.V.dV + \iint_S (\rho.V.dS)V = - \iint_{abhi} p.dS - R' \dots\dots\dots (2.14)$$

Asumsikan kondisi *steady flow*, maka menjadi

$$R' = - \iint_S (\rho V.dS)V - \iint_{abhi} p.dS \dots\dots\dots (2.15)$$

Ingat bahwa kecepatan *inflow* dan *outflow*,  $u_1$  dan  $u_2$  berada pada *x-direction* dan komponen x dari  $R'$  adalah *drag* aerodinamik per unit span  $D'$ .

$$D' = - \iint_S (\rho V.dS)u - \iint_{abhi} (p.dS)_x \dots\dots\dots (2.16)$$

Untuk tekanan konstan,

$$\iint_{abhi} (p.dS)u = 0 \dots\dots\dots (2.17)$$

Kemudian substitusikan persamaan (2.16) dan persamaan (2.17),

$$D' = - \iint_S (\rho V.dS)u \dots\dots\dots (2.18)$$

Diketahui bahwa  $ai$  dan  $bh$  berorientasi pada  $y$ -direction. *Control volume* juga mempunyai kedalaman pada  $z$ -direction. Sehingga  $dS = dy$  (1). Persamaan integral pada (2-11) menjadi,

$$\oiint_S (\rho V \cdot dS) u = - \int_i^a \rho_1 u_1^2 dy + \int_h^b \rho_2 u_2^2 dy \dots \dots \dots (2.19)$$

Sebelum melangkah lebih jauh lagi, pertimbangkan kembali bentuk persamaan kontinuitas untuk aliran *steady*. Kemudian diterapkan pada *control volume* pada gambar 2.19, sehingga persamaan kontinuitas tersebut menjadi,

$$\begin{aligned} - \int_i^a \rho_1 u_1 dy + \int_h^b \rho_2 u_2 dy &= 0 \\ \int_i^a \rho_1 u_1 dy &= \int_h^b \rho_2 u_2 dy \dots \dots \dots (2.20) \end{aligned}$$

Persamaan (2.20) dikalikan dengan  $u_1$ ,

$$\int_i^a \rho_1 u_1^2 dy = \int_h^b \rho_2 u_2 u_1 dy \dots \dots \dots (2.21)$$

Substitusi persamaan (2.21) dengan persamaan (2.19),

$$\oiint_S (\rho V \cdot dS) u = - \int_h^b \rho_2 u_2 u_1 dy + \int_h^b \rho_2 u_2^2 dy$$

$$\text{Atau} \quad \oiint_S (\rho V \cdot dS) u = - \int_h^b \rho_2 u_2 (u_1 - u_2) dy \dots (2.22)$$

Substitusi persamaan (2.22) dengan persamaan (2.19),

$$D' = \int_h^b \rho_2 u_2 (u_1 - u_2) dy \dots \dots \dots (2.23)$$

Untuk aliran *incompressible*, diketahui bahwa  $\rho = \text{konstan}$ . Maka untuk kasus ini persamaan (2.23) menjadi,

$$D' = \rho \int_h^b u_2 (u_1 - u_2) dy \dots\dots\dots (2.24)$$

(Anderson John D. JR, 1988)

Gaya aerodinamik *drag* selain bergantung pada koefisien *drag* dan hubungannya seperti rumusannya di atas, itu masih juga dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti sifat turbulensi aliran dan bilangan *reynold*. Ketergantungan pada bilangan *reynold* ini mempunyai arti bahwa koefisien *drag* bervariasi sesuai dengan kecepatan. Tetapi pengaruh ini menjadi tidak signifikan apabila kecepatan kendaraan telah melewati kecepatan normal *cruising*. Hanya dalam pengujian model kendaraan yang dilakukan di terowongan angin atau *wind tunnel*, faktor bilangan *reynold* menjadi sangat penting.

Gaya hambat atau *drag force* yang terjadi pada kendaraan menurut **Barnard (1996)** sumbernya berasal dari *surface friction drag*, *pressure* atau *form drag*, *trailing vortex drag*, *extrencence drag*, *drag* karena roda, dan *drag* karena sistem pendingin. Namun pada analisa gaya *drag* sudut pandang 2 dimensi *drag* karena roda, dan *drag* karena sistem pendingin diabaikan. Hal ini diakibatkan bentuk model uji yang minim dan tidak adanya peralatan tersebut.

#### a) *Surface friction drag*

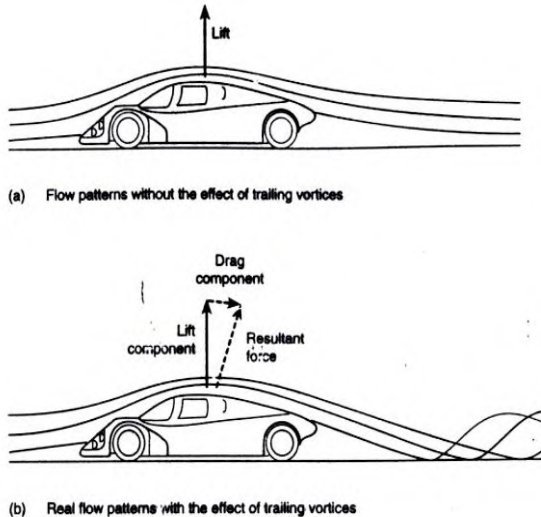
Pengaruh *surface friction drag* terhadap koefisien *drag* relatif kecil. Menurut **Barnard(1996)** yang mengutip dari hasil penelitian **Carr (1983)** bahwa besarnya sekitar 0,04 dari harga  $C_D$  keseluruhan untuk profil yang halus, dan sekitar 0,11 untuk profil yang kasar.

#### b) *Pressure atau form drag*

Aerodinamik *drag* pada kendaraan sebagian besar disebabkan oleh perbedaan tekanan yang terjadi antara permukaan bagian belakang yang rata-rata lebih rendah dari permukaan bagian depan. Distribusi tekanan yang terjadi disekeliling kendaraan dipengaruhi oleh interaksi beberapa faktor, yang terutama adalah lapisan batas atau *boundary layer*.

### c) *Trailing vortex drag*

Aliran yang mengalir pada suatu kendaraan sebenarnya adalah tiga dimensi. Konsekuensinya terjadi tekanan yang rendah pada permukaan bagian atas dibandingkan dengan bagian bawah. Akibatnya timbul gaya angkat atau *lift force*. Selain itu udara cenderung mengalir dari sisi bawah yang bertekanan tinggi ke bagian atas yang bertekanan rendah, sehingga timbul *vortices* pada daerah *wake*. *Vortices* ini disebut dengan *trailing vortices*. Terbentuknya *trailing vortices* menghabiskan momentum aliran yang cukup besar sehingga ini juga merupakan sumber dari *drag*. Gambar di bawah ini menunjukkan bentuk aliran udarayang melewati bodi mobil dengan *ground effect* yang terjadi untuk aliran dua dimensi dan aliran tiga dimensi.



Gambar 2.18 Bentuk *trailing vortice* pada aliran melewati bodi mobil dengan *ground effect* sudut pandang 2D maupun 3D  
(Barnard R.H, 1996)

Dari gambar di atas tampak pada aliran tiga dimensi *vortice* menarik udara di belakang kendaraan sehingga menciptakan tekanan yang rendah disana dan akibatnya aliran tertarik ke bawah. Karena udara berputar dengan kecepatan yang

tinggi, maka sesuai dengan persamaan Bernoulli tekanan pada *vortex* rendah. Dengan berkurangnya tekanan pada bagian belakang kendaraan maka akan memperbesar beda tekanan yang terjadi antara di depan dan belakang kendaraan yang akhirnya akan menaikkan *drag*.

Pada proses terjadinya pusaran atau *vortice* ini banyak energi yang terpakai, sehingga hal ini juga merupakan sumber *drag*.

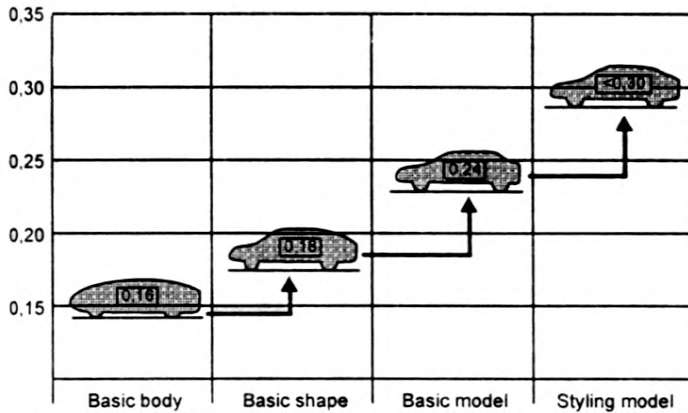
#### **d) Extremeness drag**

Banyaknya bagian yang menonjol yang terdapat pada permukaan kendaraan sehingga membentuk celah, seperti kaca spion, dapat menyebabkan terjadinya separasi lokal yang akhirnya juga menimbulkan aliran *vortice*. Akibatnya dapat menghasilkan *drag*. Selain itu *drag* dapat juga terjadi karena bagian yang menonjol tersebut dapat mempengaruhi transisi dari lapisan batas, sehingga timbulnya separasi pada aliran utama.

### **2.5.2 Gaya Lift (Gaya Angkat)**

Perbedaan bentuk antara permukaan atas dan bagian bawah kendaraan menyebabkan aliran udara pada permukaan atas lebih cepat daripada aliran udara pada permukaan bawah, sehingga tekanan pada permukaan atas kendaraan lebih rendah daripada tekanan permukaan bawah.

Faktor lain adalah kekasaran bagian permukaan bawah kendaraan yang disebabkan oleh profil mesin dan komponen lain yang memperlambat aliran di bawah sehingga memperbesar tekanan aliran permukaan bawah. Karena itu tekanan yang bekerja pada bagian bawah kendaraan secara umum lebih besar dari tekanan yang bekerja pada bagian atas kendaraan sehingga menimbulkan terbentuknya gaya angkat karena adanya desakan aliran udara dari permukaan bawah ke permukaan atas kendaraan.



Gambar 2.19 Distribusi tekanan penyebab gaya angkat (*lift force*) (Sutantra N, 2001)

Gaya ini bekerja dalam arah vertikal dan biasanya arah ke atas ditandai sebagai arah positif dan ke bawah sebagai arah negatif. Gaya *lift* secara total dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \cdot \rho \cdot V_a^2 \cdot A_f \dots \dots \dots (2.25)$$

(Sutantra N, 2001)

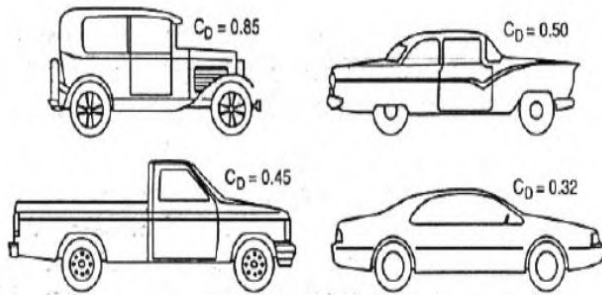
Dimana:  $C_L$  = koefisien gaya angkat.

## 2.6 Pengaruh Bentuk Bodi

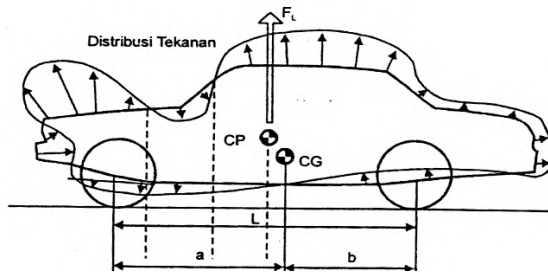
Banyak problema di dalam bidang aerodinamika yang tidak bisa diselesaikan hanya dengan perhitungan analitis dan matematis saja tetapi harus menggunakan berbagai macam eksperimen untuk membantu memecahkan permasalahan dan menunjang teori dasar yang telah ada. Dari hasil eksperimen dapat diambil suatu kesimpulan yang nantinya berguna untuk memecahkan problema aerodinamika.

Pada dasarnya proses perancangan bentuk bodi kendaraan dapat dibagi dalam 5 tahap yaitu *basic body*, *basic shape*, *basic model*, *styling model*, dan tahap akhir yaitu *production car*.





(a)



(b)

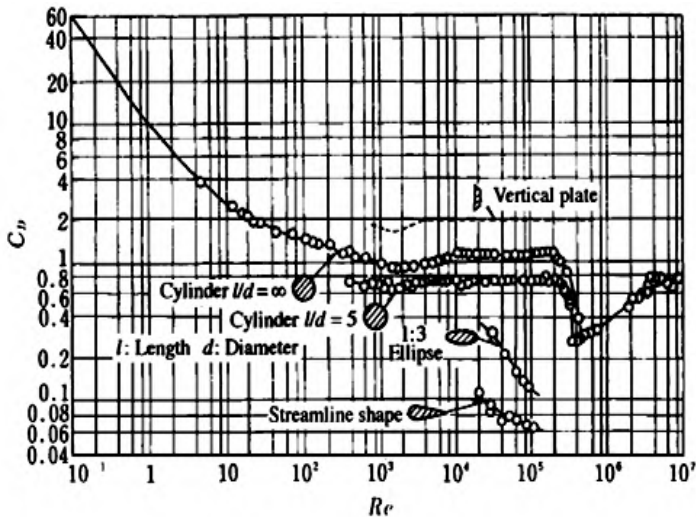
Gambar 2.20 (a) Tahap perencanaan bodi kendaraan  
(b) Percobaan bodi kendaraan yang telah dilakukan  
(Sutantra N, 2001)

Analisa yang dilakukan oleh berbagai ahli aerodinamika terhadap bentuk bodi kendaraan dilakukan dengan melakukan riset pengujian terhadap berbagai macam komponen bodi kendaraan dan pengaruhnya terhadap beban angin.

### 2.6.1 Koefisien Hambat berbagai Bentuk Kendaraan

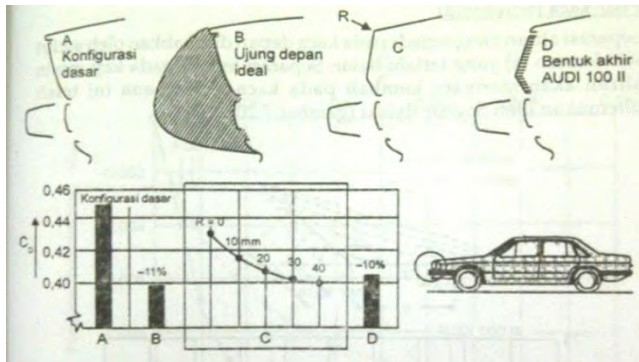
Dari tahun ke tahun model kendaraan mengarah pada penurunan koefisien hambat aerodinamika ( $C_D$ ) dan tentunya juga tidak mengurangi keindahan dari kendaraan. Koefisien *drag* dari

silinder dan berbagi macam bentuk dasar lainnya dapat dilihat dari grafik di bawah ini.



Gambar 2.21 Koefisien *drag* untuk silinder dan bentuk dasar lainnya  
(Sutantra N, 2001)

Berbagai macam penelitian telah dilakukan untuk menunjang kinerja kendaraan ketika melaju di jalanan. Berdasarkan tabel diatas, untuk mengatur gaya hambat dari kendaraan, maka perlu adanya pemikiran lanjut terhadap bodi kendaraan. Beberapa penelitian mengatakan bahwa untuk mengurangi *dragforce* langkah yang dilakukan yaitu mendesain bodi agar “*streamline*” (memperkecil koefisien *drag*,  $C_d$ ) dan mengurangi luas kontak tegak lurus arah aliran fluida/ laju kendaraan.



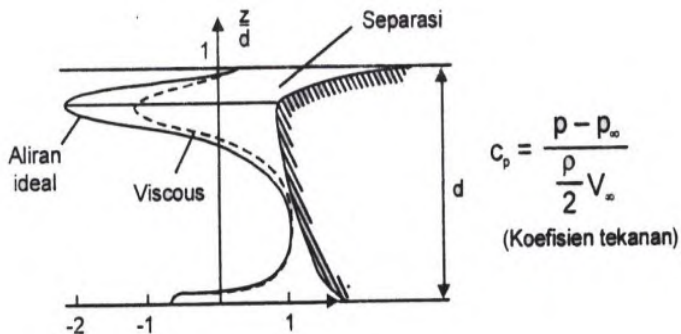
Gambar 2.22 Pengaruh modifikasi bentuk depan *Audi 100 II* terhadap gaya *drag* (Sutantra N, 2001)

Pada penelitian diatas terlihat penurunan  $C_D$  yang signifikan terhadap pengurangan dan juga penambahan pada beberapa bagian pada bodi mobil terutama daerah *leading edge*.

## 2.6.2 Pengaruh Bentuk Komponen Bodi

### a. Bagian Depan Bodi (*Forebody*)

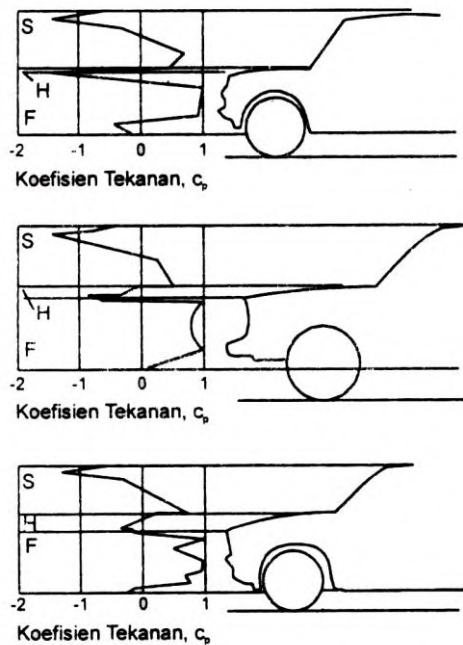
Bagian depan kendaraan merupakan hidung kendaraan yang terdiri dari kap mesin (*hood*), *windscreen* beserta perlengkapan panel depan. Separasi yang terdapat pada hidung kendaraan dapat terjadi pada bagian ujung depan kap mesin kendaraan. Gambar berikut menunjukkan separasi kecil (pemancaran angin) yang terjadi pada ujung kap mesin kendaraan.



Gambar 2.23 Aliran separasi pada kap mobil  
(Sutantra N, 2001)

Dari grafik distribusi tekanan dapat dilihat bahwa pada kondisi aliran angin yang sebenarnya (*actual flow*), titik puncak pengisapan pada ujung kap mobil lebih rendah dibandingkan pada aliran ideal (*inviscid flow*). Begitu juga tekanan di atas titik stagnasi sedikit lebih besar dibandingkan tekanan pada aliran *inviscid*. Pada titik stagnasi sendiri  $C_p = 1$  pada kedua kondisi aliran di atas. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa kekuatan yang menekan bagian depan mobil dalam aliran yang sebenarnya (*viscous flow*) lebih besar dibandingkan dalam aliran ideal (*inviscid flow*).

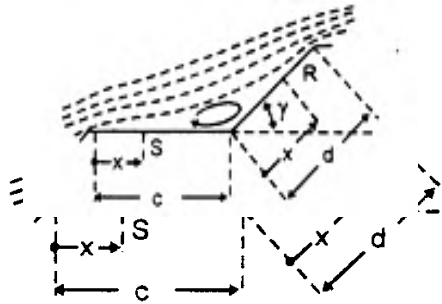
Distribusi tekanan yang mengenai bagian depan mobil berbeda-beda tergantung bentuk depan kendaraan tersebut. Gambar berikut menunjukkan grafik distribusi tekanan untuk berbagai bentuk *forebody* mobil.



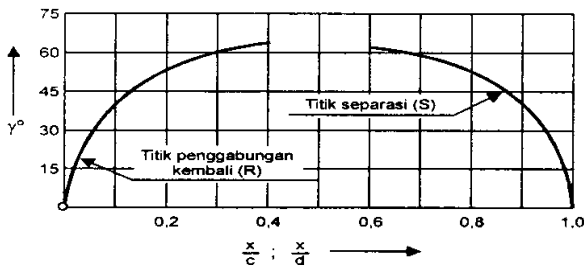
Gambar 2.24 Grafik distribusi tekanan pada *forebody* mobil.  
(Sutantra N, 2001)

b. Pilar Kaca (*Windshield*)

Separasi aliran yang terjadi pada kaca depan disebabkan oleh sudut *windscreen* yang terlalu besar. Separasi terjadi pada kap mesin aliran akan menyatu kembali pada kaca. Fenomena ini telah ditemukan oleh Scybor Rylski.



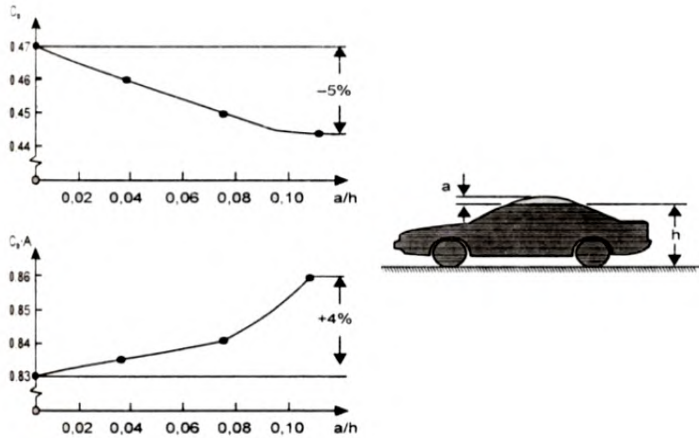
Gambar 2.25 Separasi pada kap



Gambar 2.26 Penyatuan aliran pada kaca.  
(Sutantra, N, 2001)

c. Bagian Atap Kendaraan

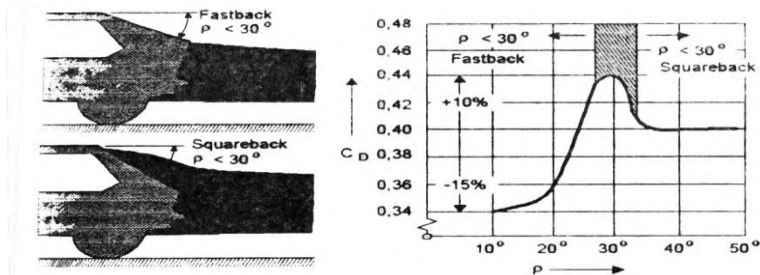
Perbaikan pada bagian atap dari kendaraan dapat dilakukan dengan mendesain atap dengan bentuk *konvex* agar memudahkan aliran udara mengalir ke belakang. Jika koveksitas diperbesar, *drag* koefisien dapat diperkecil. Jika bentuk *konvex* didesain sehingga menyebabkan pertambahan luas *frontal area*, maka aerodinamik *drag* juga meningkat. Jika tinggi atap asli dibiarkan konstan maka kaca depan dan belakang harus dibuat melengkung menuju *contour* sehingga efek konveksitas dapat tercapai.



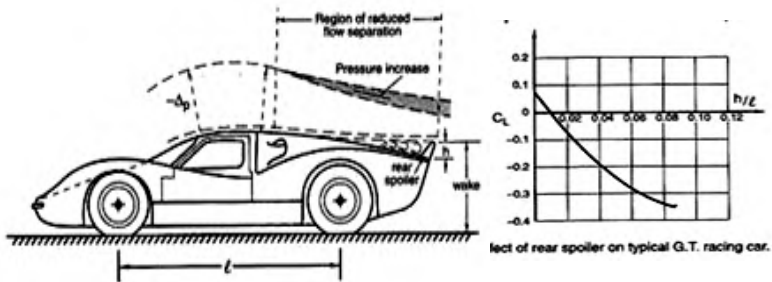
Gambar 2.27 Pengaruh konveksitas pada koefisien *drag* (Sutantra N, 2001)

#### d. Bagian Belakang Kendaraan

Reduksi *drag* juga bisa dilakukan dengan menganalisa kemiringan bentuk bagian belakang. Pada bagian belakang yang mempunyai kemiringan antara 15 derajat sampai dengan 35 derajat besarnya *drag* dan *lift* sangat bervariasi karena adanya pengaruh *vortex* yang cukup besar pada kemiringan tersebut.



(a)



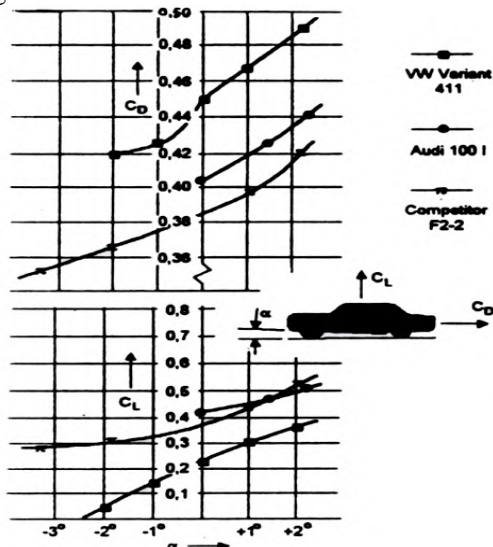
(b)

Gambar 2.28 (a) Tipikal *Flow* yang terjadi pada bodi *Streamline*  
 (b) Pengaruh kemiringan bagian belakang terhadap *drag*.

(ButterworthHeinemann, 2002; Sutantra N, 2001)

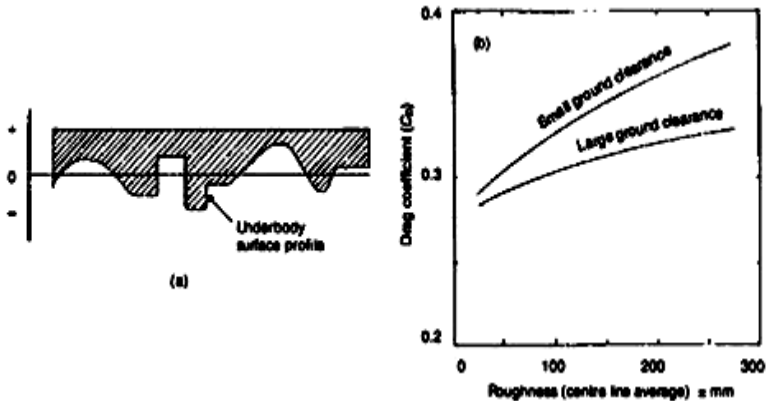
#### e. Bagian Bawah Kendaraan

Kekasaran bagian bawah kendaraan juga akan meningkatkan nilai *drag* pada kendaraan. Reduksi *drag* dapat dilakukan dengan memperhalus bagian bawah kendaraan. Kemiringan bagian bawah kendaraan ( $\alpha$ ) juga dapat mempengaruhi koefisien hambat dan koefisien angkat.



Gambar 2.29 Pengaruh kemiringan  $\alpha$  terhadap  $C_D$  dan  $C_L$   
(Sutantra N, 2001)

Berdasarkan referensi dari penelitian lain yang sudah dilakukan, harga  $C_D$  maupun  $C_L$  juga dipengaruhi oleh *contour* dari bagian bawah mobil. Untuk lebih jelasnya akan diperlihatkan pada gambar berikut:



Gambar 2.30 Pengaruh Kekasaran daerah *Underbody*  
Terhadap Koefisien Drag.  
(ButterworthH, 2002)

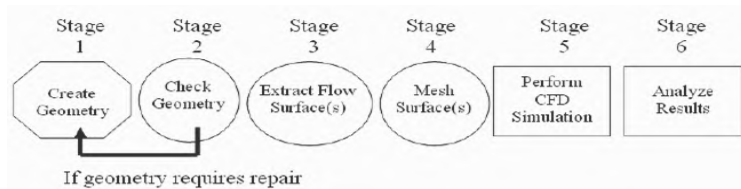
Pada penelitian diatas dijelaskan bahwa pada gaya *drag* terdapat dua komponen gaya yaitu *shear surface stress (friction drag)* dan *pressure drag*. Kecenderungan yang terjadi pada bodi kendaraan yang semakin kasar ialah semakin besarnya *friction drag*. Ini berarti memicu terjadinya titik separasi lebih awal sehingga terbentuk daerah *wake*. Karena adanya daerah ini gaya *drag* yang terjadi semakin besar karena adanya perbedaan tekanan yang besar antara daerah muka bodi dengan buritan sehingga adanya tekanan balik (*adverse pressure*) sehingga timbul komponen gaya *drag* yang kedua yaitu *pressure drag*. Semakin luas daerah *wake* ini maka *pressure drag* akan semakin meningkat. Berdasarkan penelitian, kekasaran permukaan yang memberikan efek signifikan terhadap timbulnya gaya *drag* ialah pada daerah *underbody*. Oleh karena itu,



kekasaran pada daerah tersebut haruslah diminimalisir sampai dengan dengan ukuran tertentu.

## 2.7 Dinamika Aliran Fluida secara Komputasi (*Computational Fluid Dynamics*)

Dengan menggunakan salah satu *software CFD* dapat dibuat *virtual prototype* dari sebuah sistem atau alat yang ingin dianalisis dengan menerapkan kondisi nyata di lapangan. *Computational fluid dynamics* (CFD) merupakan perangkat analisa system dengan melibatkan aliran fluida, perpindahan panas, *momentum*, perpindahan energi, dan fenomena aliran lain didasarkan simulasi berbantuan computer. Simulasi menggunakan CFD menghasilkan parameter-parameter penting seperti tekanan, suhu, kecepatan, dan laju alir massa (*mass flow rate*). Analisa menggunakan CFD diperlukan pemahaman dan pengetahuan dasar bidang mekanika fluida untuk interpretasi hasil-hasil simulasi. Penyederhanaan CFD terdiri dari tiga tahapan proses pengerjaan, yaitu *preprocessing* (spesifikasi geometri, pemilihan *turbulence model*, spesifikasi *parameter* dan *grid generation*) kemudian *postprocessing* (*visualization* dan *treatment data*). Prosedur CFD melalui tahapan seperti diagram pada gambar 2.43



Gambar 2.31 Blok diagram simulasi dengan *CFD*  
(Ahmad Haidar N, 2012)

*SoftwareCFD* akan memberikan data-data, gambar-gambar, atau kurva-kurva yang menunjukkan prediksi dari performansi keandalan sistem yang telah didesain tersebut. Hasil analisis CFD bisa menyajikan prediksi kualitatif dan kuantitatif dari berbagai persoalan dinamika fluida.

### 2.7.1 GAMBIT (*Geometry and Mesh Building Intelligent Toolkit*)

*Gambit* yang digunakan adalah *gambit 2.4.6*. *Software gambit* ini dapat membuat geometri dan membuat *meshing* untuk berbagai macam bentuk, termasuk bentuk-bentuk yang rumit dan tidak beraturan. Pembuatan geometri yang digunakan dalam *software* ini adalah koordinat (x,y). *Meshing* merupakan proses selanjutnya setelah menggambar geometri dimana *meshing* dapat dilakukan dengan berbagai macam bentuk *mesh*, yaitu *mesh* heksahedral terstruktur dan tidak terstruktur, tetrahedral, piramid, dan prisma. Selain itu, pada *software Gambit* ini juga dapat dilakukan pengecekan kualitas *mesh* sesuai dengan standar yang kita inginkan. Semakin kecil kualitas *meshing* yang dibuat maka semakin akurat data yang di peroleh. Tahap pemodelan terakhir pada *Gambit* adalah proses penentuan jenis kondisi batas. *Mesh* yang telah dibuat pada *Gambit* dapat diekspor ke semua *solverFluent*. *Software* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Gambit 2.4.6*.

### 2.7.2 FLUENT

*Fluent* adalah satu jenis program CFD yang menggunakan metode volume hingga (*finite volume*). *Fluent* menyediakan fleksibilitas *mesh* yang lengkap, sehingga dapat menyelesaikan kasus aliran fluida dengan *mesh* (*grid*) yang tidak terstruktur sekalipun dengan cara yang relatif mudah. Jenis *mesh* yang didukung oleh *Fluent* adalah tipe 2D (*two dimension*) *triangular-quadrilaterall*, 3D (*three-dimension*) *tetrahedral-hexahedral-pyramid-wedge*, dan *mesh* campuran (*hybrid*). *Fluent* juga memungkinkan penggunaanya untuk memperhalus atau memperbesar *mesh* yang sudah ada. Beberapa kelebihan *Fluent* yaitu mudah untuk digunakan, model yang realistik (tersedia berbagai pilihan *solver*), diskritisasi atau *meshing* model yang efisien (dalam *Gambit*), cepat dalam penyajian hasil (bisa dengan paralel komputer), dan visualisasi yang mudah untuk dimengerti. Aplikasi *Fluent* di dalam dunia industri, sering digunakan untuk desain dari suatu sistem fluida, dan juga untuk mencari sumber atau analisis kegagalan suatu sistem fluida. *Software* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Fluent 6.3.26*.

## 1) Formulasi Solver

Di dalam *Fluent* tersedia tiga formulasi *solver*, yaitu *segregated*, *coupledimplisit*, dan *coupledeksplisit*. Ketiga formulasi tersebut menghasilkan solusi yang akurat untuk berbagai jenis kasus, tetapi pada beberapa kasus tertentu salah satu formulasi mungkin dapat menghasilkan solusi yang lebih cepat daripada yang lain.

Formulasi *solversegregated* menyelesaikan persamaan-persamaan pada suatu kasus secara bertahap, sedangkan pada *solver coupled* menyelesaikan semua persamaan secara bersamaan. Kedua formulasi *solver* tersebut menyelesaikan persamaan untuk besaran-besaran tambahan (misalnya, radiasi, turbulensi) secara bertahap. *Solver coupled* implisit dan eksplisit mempunyai perbedaan pada cara melinierkan persamaan-persamaan yang akan diselesaikan.

Secara umum, *solversegregated* banyak digunakan untuk kasus dengan fluida inkompresibel dan kompresibel dengan kecepatan aliran rendah sampai menengah (bilangan *Mach*  $< 1$ ). Adapun *solver coupled* pada dasarnya didesain untuk kasus fluida kompresibel dengan kecepatan tinggi (bilangan *Mach*  $\geq 1$ ).

## 2) Penentuan Model

Pada *Fluent* terdapat beberapa model dan persamaan dasar yang dapat dipilih sesuai dengan kasus yang akan dianalisis. Persamaan-persamaan tersebut meliputi model multifasa, persamaan energi, model viskos, model spesies transport dan reaksi, model fasa diskrit, model pembekuan dan peleburan, dan model akustik. Pada topik kali ini akan dibahas lebih lanjut mengenai persamaan energi dan model viskos.

Secara garis besar, model *turbulen* dapat didekati dengan dua pendekatan, yaitu berdasarkan *Reynolds Averaged Navier Stokes* (*RANS*) dan berdasarkan *Large Eddy Simulation* (*LES*). Sebelum menentukan model viskos, harus ditentukan terlebih dahulu apakah aliran fluida yang akan disimulasikan termasuk dalam aliran *laminar* atau *turbulen* dengan menghitung bilangan *Reynolds* terlebih dahulu. Apabila termasuk aliran *turbulen*, maka *Fluent* menyediakan beberapa model turbulensi, yaitu model *Spalart - Allmaras*, model *k-epsilon* ( $k - \epsilon$ ) *Standard*,  $k - \epsilon$  *Renormalization group* ( $k - \epsilon$  *RNG*),  $k - \epsilon$  *Realizable*, model  $k - \omega$  *Standard*,  $k - \omega$  *Shear Stress Transport*

(SST), model *Reynoldsstress* (RSM), dan model *Large Eddy Simulation* (LES) khusus 3D.

Dari pemodelan-pemodelan tersebut, pemodelan turbulensi yang baik dalam memprediksi tekanan statis dinding adalah pemodelan  $k - \epsilon$  *realizable*. Hal ini dikarenakan *error* yang terjadi pada model tersebut adalah paling kecil, sehingga dapat dikatakan lebih akurat dibandingkan pemodelan lain untuk mendeskripsikan tekanan statis. Model *k-epsilon realizable* merupakan pengembangan model yang relatif baru dan berbeda dengan model *k-epsilon* dalam dua hal, yaitu:

- Pada model *k-epsilon realizable* terdapat formulasi baru untuk memodelkan viskositas *turbulen*.
- Sebuah persamaan untuk *epsilon* telah diturunkan dari persamaan untuk menghitung fluktuasi vortisitas rata-rata.

Istilah *realizable* mempunyai arti bahwa model tersebut memenuhi beberapa batasan matematis pada bilangan *Reynolds*, konsisten dengan bentuk fisik aliran *turbulen*. Kelebihan dari model *k-epsilon realizable* adalah lebih akurat untuk memprediksikan laju penyebaran fluida dari pancaran jet/nozel. Model ini juga memberikan performa yang bagus untuk aliran yang melibatkan putaran, lapisan batas yang mempunyai gradien tekanan yang besar, separasi, dan resirkulasi. Salah satu keterbatasan model *k-epsilon realizable* ialah terbentuknya viskositas *turbulen* non fisik pada kasus dimana domain perhitungan mengandung zona fluida yang diam dan berputar (*multiple reference frame, sliding mesh*).

### 3) Penentuan Kondisi Batas

Untuk mendefinisikan suatu kasus, harus dimasukkan informasi pada variabel aliran pada domain kasus tersebut, antara lain fluks massa, momentum, energi, dan lain-lain. Informasi tersebut salah satunya harus dimasukkan dalam kondisi batas (*boundarycondition*). Penentuan kondisi batas melibatkan beberapa hal, yaitu:

- mengidentifikasi lokasi kondisi batas, misalnya sisi masuk, sisi keluar, dinding, dan lain-lain;
- memasukkan informasi/data pada batas yang telah ditentukan.

Data yang diperlukan (input) pada kondisi batas merupakan data yang sudah diketahui atau data yang dapat diasumsikan. Tetapi asumsi data tersebut harus diperkirakan mendekati yang sebenarnya. *Input* data yang salah pada kondisi batas akan sangat berpengaruh terhadap hasil simulasi. Kondisi batas yang terdapat pada *Fluent* sebagai berikut:

- Umum: *pressure inlet, pressure outlet*
- Aliran inkompresibel: *velocity inlet, outflow*
- Aliran kompresibel: *mass flow inlet, pressure far-field*
- Spesial: *inlet vent, outlet vent, intake fan, exhaust fan*
- Sisi ganda (*doublesided*): *fan, interior, porous jump, radiator*
- Lain-lain: *wall, symmetry, periodic, axis*

Pada pembahasan kali ini akan dibahas lebih lanjut mengenai *velocity inlet, outflow, dan wall*.

#### **a) *Velocity Inlet***

Kondisi batas *velocity inlet* digunakan untuk mendefinisikan kecepatan aliran dan besaran skalar lainnya pada sisi masuk aliran. Kondisi batas ini hanya digunakan untuk aliran inkompresibel. Metode spesifikasi kecepatan yang ada pada kondisi batas ini adalah:

- Komponen (*Components*)
- Besar/nilai kecepatan, tegak lurus terhadap batas (*Magnitude, normal to boundary*)
- Besar/nilai kecepatan dan arah (*Magnitude & direction*)

#### **b) *Outflow***

Kondisi batas ini digunakan apabila data aliran pada sisi keluar tidak diketahui sama sekali atau dapat diabaikan. Data pada sisi keluar diekstrapolasi dari data yang ada pada aliran sebelum mencapai sisi keluar. tidak perlu dimasukkan data apapun pada kondisi batas ini. Keterbatasan kondisi batas *outflow* adalah:

- Hanya dapat dipakai jika aliran pada sisi keluar adalah aliran berkembang penuh (*fully developed*).
- Hanya dapat dipakai untuk aliran inkompresibel.

- Tidak dapat digunakan bersamaan dengan kondisi batas *pressure inlet*, harus menggunakan kondisi batas *velocity inlet* pada sisi masuk.
- Tidak dapat digunakan untuk aliran transien dan massa jenis yang tidak konstan sepanjang aliran.
- Tidak dapat digunakan untuk kasus yang mengalami aliran balik pada sisi keluarnya, karena persamaan yang digunakan untuk mengekstrapolasi data pada aliran megasumsikan aliran yang terjadi pada sisi keluar adalah aliran berkembang penuh yang tidak mungkin terjadi aliran balik. Oleh karena itu apabila hendak dipakai kondisi batas *outflow*, harus dipastikan terlebih dahulu bahwa lokasi kondisi batas tersebut telah berada pada daerah aliran berkembang penuh.

#### c) *Wall*

Kondisi batas ini digunakan sebagai dinding untuk aliran fluida dalam saluran atau dapat disebut juga sebagai dinding saluran. Kondisi batas ini digunakan juga sebagai pembatas antara daerah fluida (cair dan gas) dan padatan. Pada aliran viskos, kondisi *no slip* yang terjadi pada dinding sebagai berikut:

- Kecepatan tangensial fluida pada dinding sama dengan kecepatan dinding, jadi apabila dindingnya tidak bergerak maka kecepatan tangensial fluida pada dinding sama dengan nol.
- Komponen arah normal kecepatan fluida pada dinding sama dengan nol.
- Tegangan geser yang terjadi antara dinding dan fluida dapat ditentukan.

Apabila persamaan energi diaktifkan, maka pada dinding terdapat beberapa tipe fungsi kondisi termal antara lain *heatflux*, temperatur, konveksi, dan radiasi. Kekasaran permukaan dinding dapat ditentukan apabila menggunakan model viskos *turbulen*. Dinding juga dapat dibuat bergerak secara translasi dan rotasi.

*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

### BAB III

## METODOLOGI PENELITIAN

Dikarenakan keterbatasan alat ukur dan visualisasi karakteristik aliran melintasi bodi mobil *Urban Nogogeni* maka penelitian ini menggunakan metode numerik dengan *software Fluent* 6.3.26. Pada metode numerik ini ada tiga tahapan utama yang harus dilakukan, antara lain: *preprocessing*, *solving*, atau *processing* dan *postprocessing*. Juga disertakan penampilan 3D dari bodi mobil *Urban Nogogeni*.

### 3.1 Design Criteria

Bodi mobil *Nogogeni* dibuat dengan tujuan agar memperkecil gaya drag dengan acuan yaitu bodi mobil *Nogogeni 3*, berikut *Lift Coefficient* ( $C_L$ ) dan *Drag Coefficient* ( $C_D$ ) mobil *Nogogeni 3*

$C_D$	0.34115342
$C_L$	0.16974343

Tabel 3.1  $C_D$  dan  $C_L$  *Nogogeni 3*  
(Iffan Yahya, 2015)

Dari hasil pada tabel 3.1 diharapkan bodi mobil *Nogogeni* bisa mempunyai *Drag Coefficient* yang lebih kecil dan *Lift Coefficient* yang cukup. Karena itu dilakukan beberapa perubahan pada bodi mobil *Nogogeni* yaitu bentuk bagian depan yang lebih runcing untuk mengurangi *stagnation area*, luas permukaan total bodi yang lebih kecil untuk mengurangi *friction drag*, bentuk *diffusor* yang lebih kecil untuk mengurangi terjadinya *bubble separation* dengan resiko lebih tidak teraturnya aliran udara yang melintasi bagian yang tidak ada *diffusor*.

### 3.2 Preprocessing

*Preprocessing* merupakan langkah pertama dalam membangun dan menganalisa sebuah model komputasi (*CFD*). Tahapan ini meliputi beberapa sub-tahapan antara lain: pembuatan



geometri, penentuan domain, pembuatan *meshing* dan penentuan parameter-parameter yang digunakan.

**3.2.1 Geometri Mobil *Nogogeni***

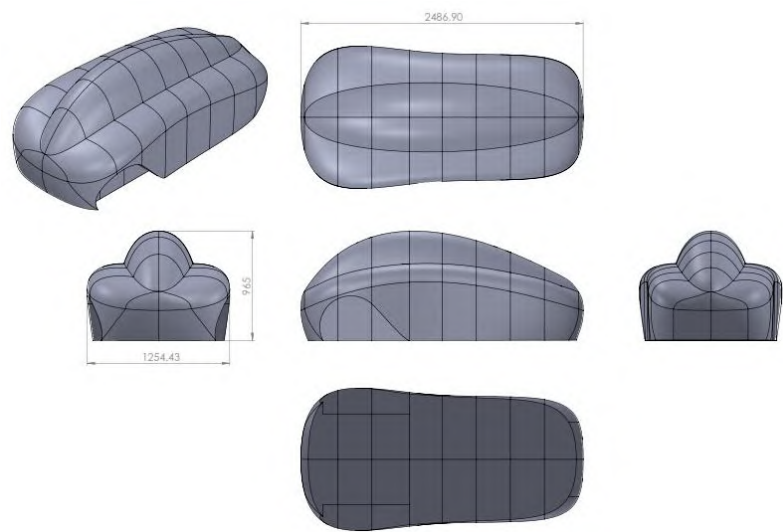
Pembuatan geometri mobil *Urban Nogogeni* ini menggunakan *software Solid Works*. Adapun geometri dan dimensi dari mobil *Urban Nogogeni* dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Parameter	Dimensi (mm)
L	2486.90
W	1254.43
H	965

Tabel 3.2 Dimensi bodi mobil *Nogogeni*

*a. Pembuatan Geometri Mobil Urban Nogogeni*

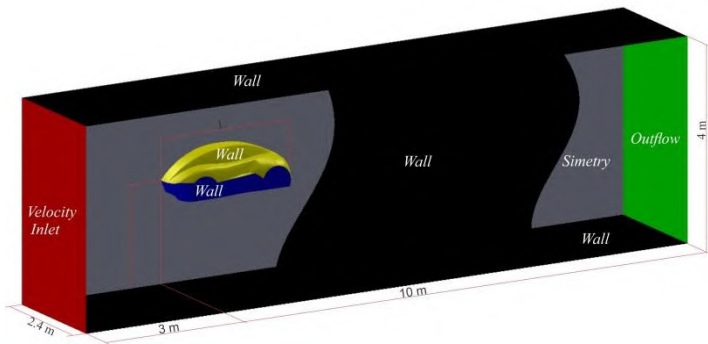
Langkah pertama yakni menggambar *geometri* bodi mobil *Urban Nogogeni*.



Gambar 3.1 *Geometri 3D* bodi mobil *Urban Nogogeni*

### 3.2.2 DomainPemodelan

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik aliran 3D yang melintasi body yaitu pengujian dengan tidak menyertakan *ground clearance*. Penentuan dimensi domain merujuk pada penelitian berbasis *vehicle aerodynamics* yang dilakukan oleh **Damjanović** dalam pemodelan numerik yang nantinya menjadi batasan pada *software Fluent 6.3.26*. berikut adalah gambar domain yang digunakan untuk pemodelan:



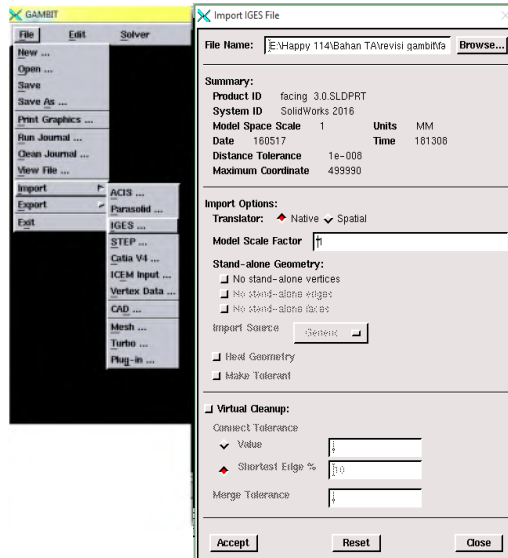
Gambar 3.2 Domain Pemodelan Bodi (3D-flow)

### 3.2.3 Meshing

Bidang atau volum yang diisi oleh fluida dibagi menjadi jarring-jaring kecil (*mesh*) sehingga kondisi batas dan beberapa parameter yang diperlukan dapat diaplikasikan ke dalam elemen-elemen tersebut. Untuk pemodelan 3D dipilih *hexagonal-map* dengan menggunakan *interval size*.

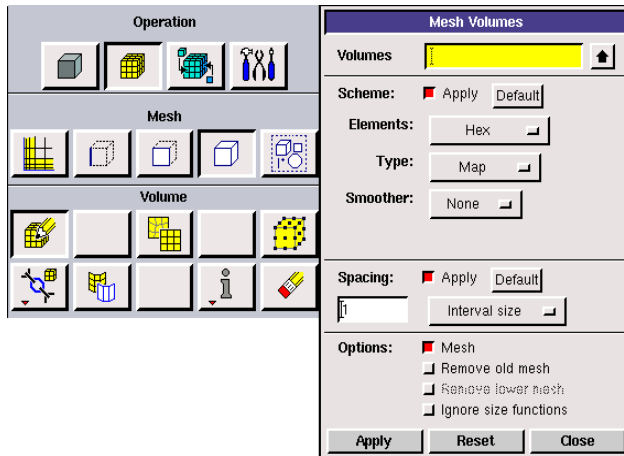
Untuk pembuatan *meshing* pada gambit, geometri 3D pada *solidworks* disimpan dalam format *IGES.igs*. Hal ini dimaksudkan untuk memudahkan dalam pembuatan geometri di gambit nanti. Dengan format IGS nantinya hanya tinggal meng-*import* saja. Berikut langkah-langkah pembuatan *meshing* pada Gambit:

1. Mengklik File → Import → IGES, kemudian pilih *browse* untuk mencari file yang akan di-*import* ke gambit. Sehingga pada Gambit akan muncul tampilan seperti berikut:

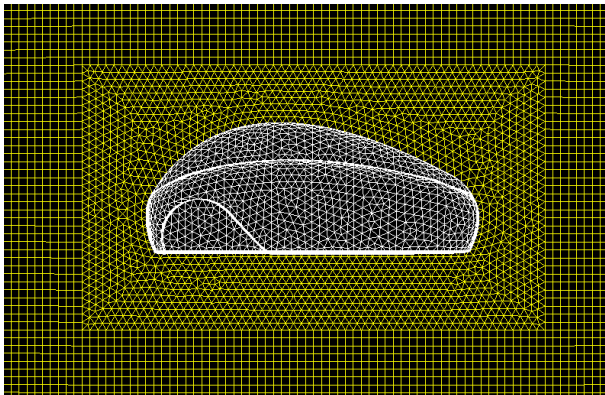


Gambar 3.3 *Import geometri pada Gambit*

2. Membuat geometri setelah itu mengubah surface elemen menjadi bagian – bagian kecil (membuat *mesh*) dengan sebelumnya menjadikan geometri gambar menjadi sebuah *face* (ditandai dengan warna garis berwarna biru muda). Setelah itu dilakukan *subtract* pada mobil dengan domain pemodelan **Damjanovic**, karena mobil dalam keadaan diam dan akan dialir ifluida (udara).
3. Membuat *interval mesh* (klik menu operation *mesh - mesh edge*) yang kemudian di *meshing* pilih sub menu *mesh volume* jika ingin melakukan *mesh* volume, pilih sub menu *mesh face* jika ingin melakukan *mesh* permukaan dan pilih sub menu *mesh edge* jika ingin melakukan *mesh* garis. Umumnya dilakukan *mesh* garis terlebih dahulu lalu *mesh* permukaan dan terakhir dilakukan *mesh* volume agar didapatkan hasil *meshing* seperti yang diinginkan.



Gambar 3.4 Menu *Meshing*

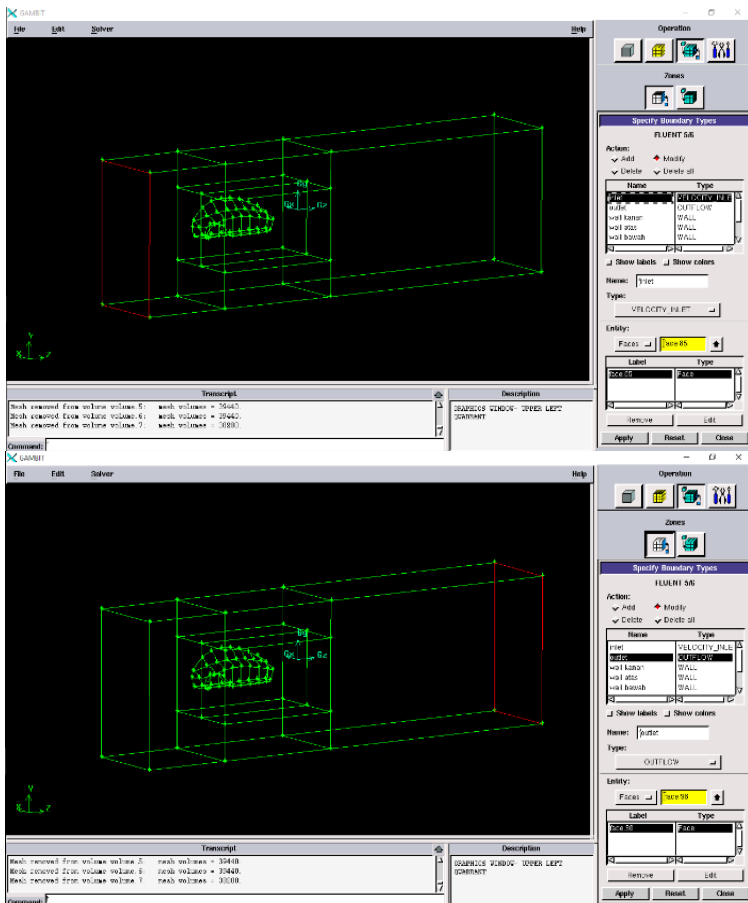


Gambar 3.5 Hasil *Meshing 3D*

#### 4. Pemberian kondisi batas pada *Gambit*

Pemberian kondisi batas ini ditujukan agar mempermudah pengambilan data khususnya pemilihan bagian-bagian yang nantinya akan di-input nilai *properties* saat dioperasikan pada *softwareFluent 6.3.26*.

Pemberian kondisi batas model ini dibagi menjadi enam kondisi batas yaitu *lowerside* bodi mobil, *upperside* bodi mobil, *inlet* sebagai daerah input *properties* kecepatan awal, *outlet* sebagai batas analisa *control surface* pada model uji, dinding atas dan bawah karena pada analisa model uji ini disimulasikan seolah – olah aliran fluida melewati *contour* bodi mobil di dalam terowongan.

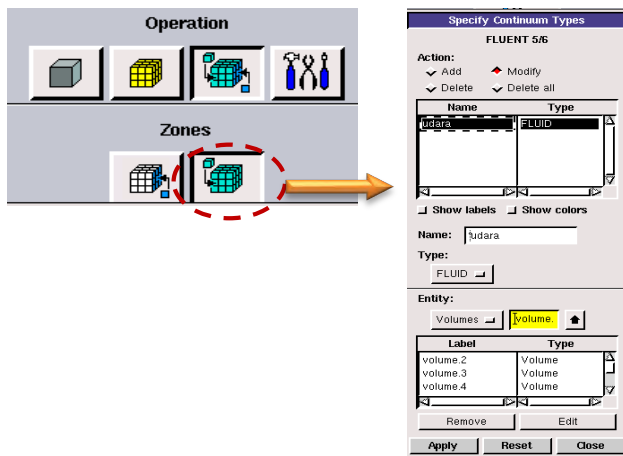


Gambar 3.6 Daerah batas *inlet* & *outlet*

Pada saat memilih batas *outlet* sebagai *control volume* yang perlu diperhatikan adalah pemilihan tipe *outflow*, karena pada tipe *outlet* harus disesuaikan pemilihan di daerah *inlet*. pemilihan ini juga akan mempengaruhi arah distribusi kecepatan pada saat dioperasikan pada *softwareFluent*.

5. Mendefinisikan kondisi batas semua bidang *mesh* sebagai fluida udara.

Pendefinisian ini dilakukan karena *meshing* pada semua bidang akan disimulasikan sebagai fluida udara yang mengalir arah koordinat Z positif menuju koordinat Z negatif. Serta akan mempermudah analisa *software Fluent* saat dioperasikan model uji tersebut. Berikut merupakan langkah membuat model uji yang mendefinisikan kondisi batas bidang *mesh* sebagai fluida udara.

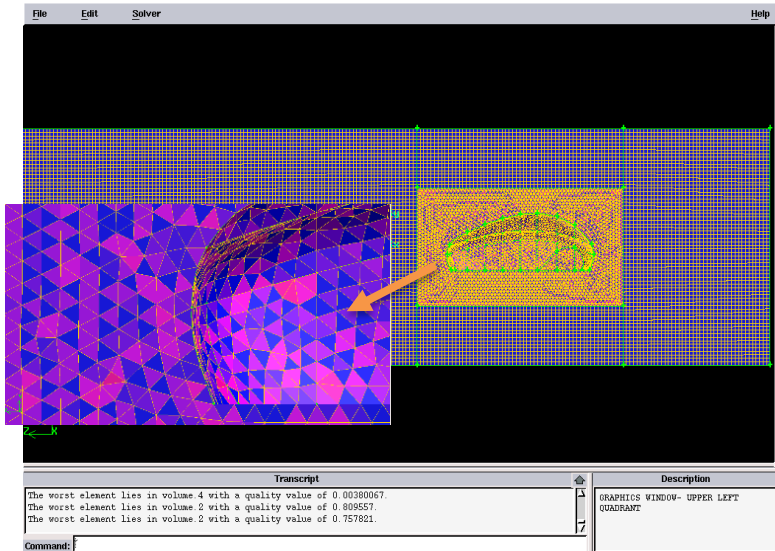


Gambar 3.7 Menu pemilihan *mesh* yang didefinisikan sebagai fluida udara

6. Kualitas Mesh

Cek kualitas *mesh* untuk memeriksa kualitas meshing pada meshing 3 dimensi yang telah dibuat pada gambit. Dimana kualitas *mesh*  $\leq 0.9$ . Kualitas *mesh* ini tergantung pada 2 *skew element* pada *software gambit* yaitu *Equiangle Skew* yaitu kualitas mesh berdasarkan sudut yang dibuat pada masing-masing elemen *mesh*

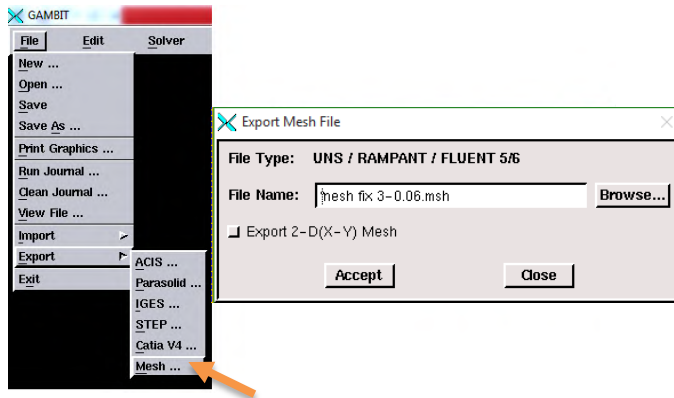
yang ditentukan dengan persamaan tertentu pada *gambit*, yang kedua yaitu *Equisize Skew* yaitu kualitas *mesh* yang tergantung pada ukuran yang dihasilkan pada masing-masing elemen *mesh* sebagai contoh jika ditentukan *interval meshing* 0.06 maka elemen yang hasilnya jauh dari 0.06 termasuk hasil *meshing* yang buruk.



Gambar 3.8 Cara mengetahui kualitas *meshing*

## 7. Meng-export file kerja GAMBIT

Langkah ini dimaksudkan agar bentuk geometri *meshing* yang telah dibuat pada *software GAMBIT* dapat dioperasikan oleh *software Fluent*. Untuk itu file yang telah dibuat dalam *software GAMBIT* harus di ekspor ke *file type: .msh*.



Gambar 3.9 meng-export ke filetype .msh

### 3.2.4 Parameter Pemodelan

Pada pemodelan karakteristik fluida ini akan menggunakan salah satu *software* analisis komputasi fluida dinamik atau *Computational Fluid Dynamic (CFD)*. *Gambit 2.2.30* dan *Fluent 6.3.26* merupakan salah satu program dari *CFD*. Langkah pertama dalam pengoperasian *software* ini adalah membuka *software Fluent 6.3.26*. dengan fitur 3D.

Berikut ini merupakan langkah-langkah pemodelan numerik menggunakan *software Fluent 6.3.26* :

#### 1. *Grid*

Langkah ini dilakukan dengan meng-import *grid* yang telah dibuat pada *software Gambit 2.2.30*

#### 2. *Models*

Sebelum menentukan model viscous, harus ditentukan terlebih dahulu apakah aliran yang disimulasikan termasuk aliran laminar atau turbulen. Dalam kasus ini digunakan model *k-epsilon* dengan *realizable* karena diharapkan hasil yang diperoleh akurat dalam memprediksi laju penyebaran fluida.

#### 3. *Materials*

Langkah yang paling penting dalam pemodelan di *Fluent 6.3.26* adalah mendefinisikan sifat fisik material. Pada *form material* terdapat



data-data propertis dan material yang harus dimasukkan. Dalam hal ini material yang digunakan adalah udara dengan *density*  $1,225 \text{ kg/m}^3$  dan *viscousity*  $1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m}$ .

#### **4. Operating Conditions**

Merupakan perkiraan kondisi yang diberikan pada kondisi pengoperasian STP (*Standart, Temperature and Pressure*) berupa tekanan (p) disekitar Mobil *Urban Nogogeni*, yaitu sebesar 1 atm = 101325 Pascal dan penambahan gravity dengan memasukkan data gravitasi ke sumbu  $Y = -9,81$ .

#### **5. Boundary Conditions**

Merupakan penentuan kondisi batas melibatkan beberapa hal, yaitu dengan pemberian beban kecepatan, tekanan maupun pemberian kondisi batas turbulensi pada *inlet*, *outlet* serta kondisi pada *wall*. Pada kondisi batas *inlet* adalah kecepatan sebesar 8,3 m/s dan pada kondisi batas *outlet* adalah *outflow*. Kondisi pada batas dinding atas lorong angin dan batas dinding bawah lorong angin adalah *wall* termasuk juga seluruh bodi dari Mobil *Urban Nogogeni*.

#### **6. Solution**

Solusi pada pemodelan ini adalah menggunakan *simplec* (karena dapat mempercepat konvergensi untuk kasus yang sederhana) dan diskritisasinya menggunakan *second order*, *second order upwind*.

#### **7. Initialize**

Proses *iterate* memerlukan *initialize* (tebakan awal) sebelum memulai perhitungan agar memudahkan konvergen.

#### **8. Monitor Residual**

Menentukan kriteria konvergensi, dalam hal ini iterasi hingga mencapai harga  $10^{-5}$ , artinya *convergence criterion* yang diinginkan. *Convergence criterion* ditetapkan sebesar proses iterasi dinyatakan telah konvergen setelah residualnya mencapai harga di bawah  $10^{-5}$ .

9. Iterasi

Menentukan kriteria konvergensi (tebakan awal dari hasil iterasi) pada *Fluent* 6.3.26.

3.3 Processing atau Solving

Dengan bantuan software *fluent* 6.3.26, kondisi-kondisi yang telah ditetapkan pada saat *preprocessing* akan dihitung (diiterasi). Jika kriteria konvergensi tercapai dengan kriteria konvergensi  $10^{-5}$ , maka tahapan dilanjutkan pada *postprocessing* dan jika tidak tercapai tahapan akan mundur kebelakang pada tahapan pembuatan *meshing*.

3.4 Postprocessing

*Postprocessing* merupakan penampilan hasil serta analisa terhadap hasil yang telah diperoleh berupa data kualitatif dan data kuantitatif. Data kuantitatif berupa distribusi koefisien tekanan, koefisien *drag* dan koefisien *lift*. Sedangkan data kualitatif berupa visualisasi aliran dengan menampilkan *pathlines* berupa *velocity magnitude*.

3.5 Alokasi Waktu Penelitian

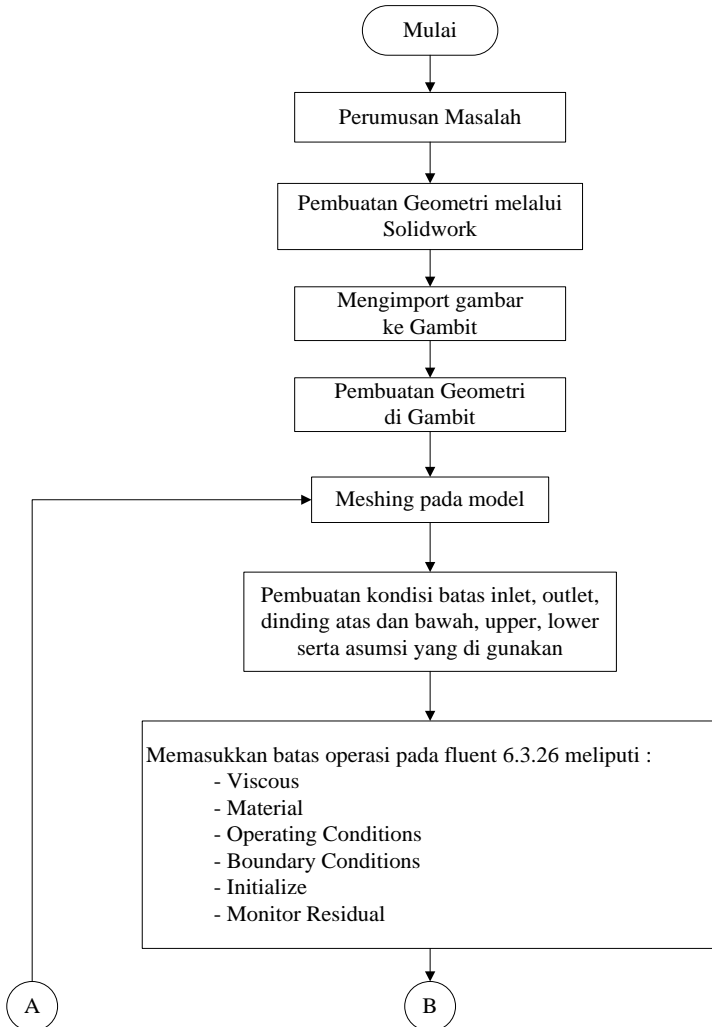
Penelitian ini dijadwalkan dalam waktu enam bulan dengan rincian kegiatan seperti table dibawah ini :

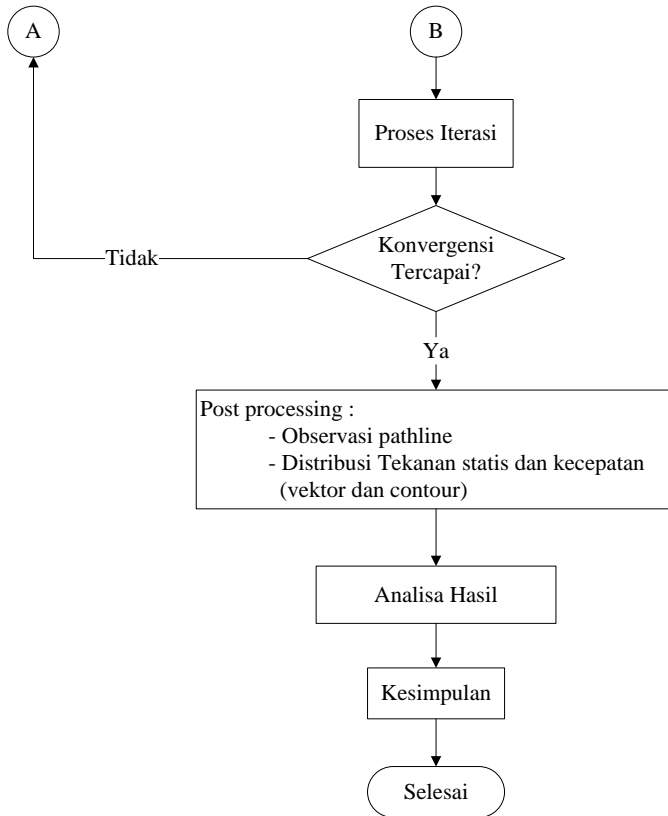
no	kegiatan	WAKTU																							
		I				II				III				IV				V				VI			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Studi Pustaka																								
2	Analisa 3 Dimensi																								
3	Pembuatan model Solidwork 3D																								
4	Pembuatan model Meshing Gambit																								
5	Iterasi Fluent																								
6	Postprocesing data																								
7	Penulisan laporan																								
8	Sidang tugas Akhir																								

Tabel 3.3 Alokasi Waktu Penelitian

### 3.6 Diagram Alir (*Flowchart*) Metode Penelitian

Berikut ini adalah metode penelitian yang dipakai dalam penganalisaan karakteristik aliran pada bodi *Urban Nogogeni* :





Gambar 3.10 *Flowchart* metodologi penelitian

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB IV

### ANALISA DAN PEMBAHASAN

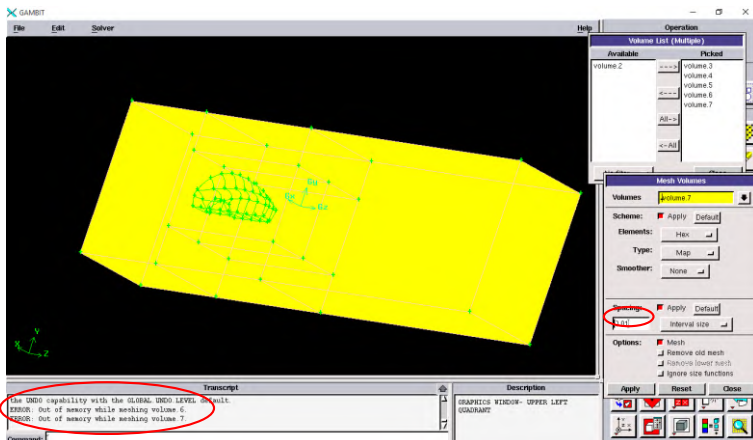
Pada Tugas Akhir ini pengamatan dilakukan pada bagian bodi dari mobil *Nogogeni*. Bentuk bodi mobil *Nogogeni* dilakukan analisa 3 dimensi dengan pengujian menggunakan *software Fluent* 6.3.26, untuk mendapatkan *contour of pressure*, *velocity vector*, *pathlines of velocity*, grafik koefisien tekanan ( $C_p$ ), koefisien drag ( $C_d$ ), koefisien lift ( $C_l$ ). Sehingga dapat dilakukan analisa distribusi tekanan, analisa distribusi kecepatan dan analisa gaya drag dan lift .

#### 4.1 Meshing's Grid Value

Pada simulasi ini digunakan *interval mesh* 0.06 dikarenakan banyak pertimbangan yaitu kemampuan PC/*Hardware* dan kualitas *mesh*. Metode yang digunakan dalam menentukan *interval mesh* pada simulasi ini adalah metode *trial and error*. Ada beberapa *interval mesh* yang pernah digunakan dan tidak bisa digunakan karena beberapa sebab, di antaranya sebagai berikut.

##### 1. Interval Mesh 0.01

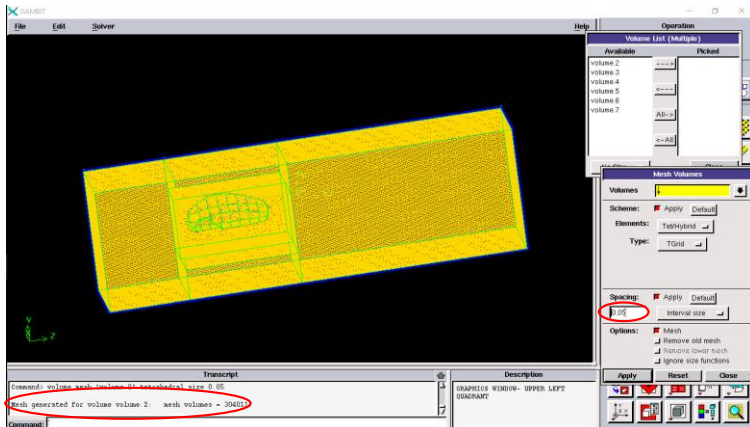
Percobaan pertama menggunakan *interval mesh* 0.01, pada *interval mesh* 0.01 tidak bisa digunakan karena kemampuan PC yang belum memadai seperti gambar di bawah berikut.



Gambar 4.1 Interval mesh 0.01

## 2. Interval Mesh 0.05

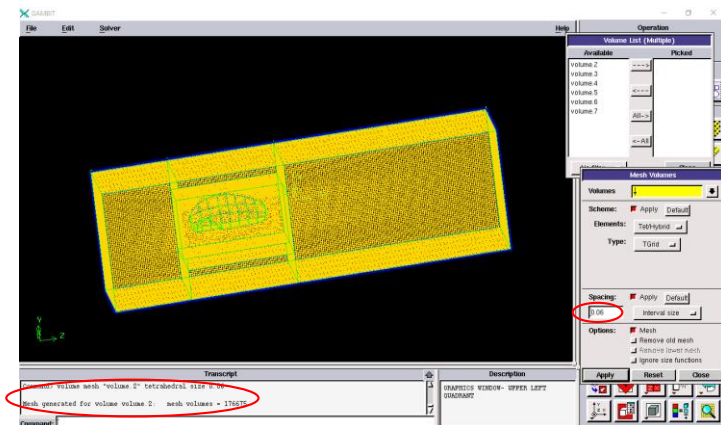
Pada *interval mesh* 0.05 *meshing* berhasil tidak ada peringatan pada *gambit* seperti gambar berikut.



Gambar 4.2 *Interval mesh* 0.05

## 3. Interval Mesh 0.06

Pada *interval mesh* 0.6 *meshing* berhasil tidak ada peringatan pada *gambit* seperti gambar berikut.

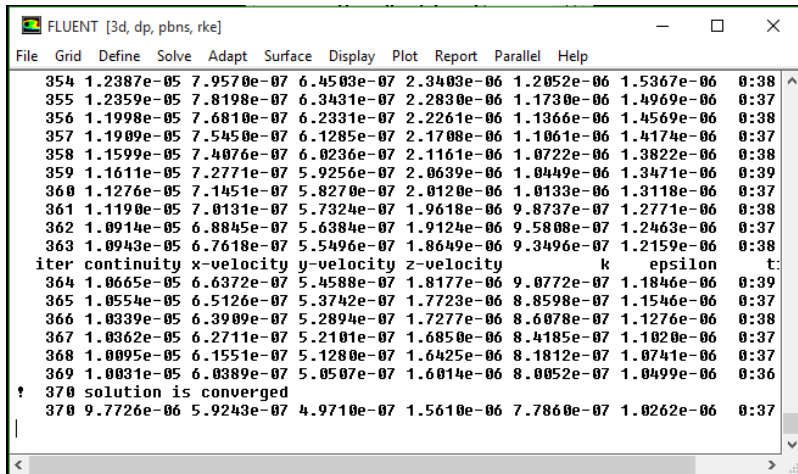


Gambar 4.3 *Interval mesh* 0.06

*Interval mesh* 0.05 tidak digunakan dikarenakan saat melakukan proses iterasi pada software *Fluent* tidak terjadi konvergensi. Sehingga, dengan beberapa pertimbangan dan percobaan di atas maka digunakan *interval mesh* 0.06 karena tidak ada *error* sama sekali dan jumlah titik disekitar bodi dirapatkan agar semua fenomena diharapkan dapat tertangkap.

#### 4.2 Iteration and Running Time

Dengan *interval mesh* 0.06 dan kriteria konvergensi  $10^{-5}$ , untuk mencapai konvergensi ada 370 jumlah iterasi dan membutuhkan waktu untuk *running* 1 jam sampai dengan 2 jam.



Iteration	U	V	W	P	K	E	T
354	1.2387e-05	7.9570e-07	6.4503e-07	2.3403e-06	1.2052e-06	1.5367e-06	0:38
355	1.2359e-05	7.8198e-07	6.3431e-07	2.2830e-06	1.1730e-06	1.4969e-06	0:37
356	1.1998e-05	7.6810e-07	6.2331e-07	2.2261e-06	1.1366e-06	1.4569e-06	0:38
357	1.1909e-05	7.5450e-07	6.1285e-07	2.1708e-06	1.1061e-06	1.4174e-06	0:37
358	1.1599e-05	7.4076e-07	6.0236e-07	2.1161e-06	1.0722e-06	1.3822e-06	0:38
359	1.1611e-05	7.2771e-07	5.9256e-07	2.0639e-06	1.0449e-06	1.3471e-06	0:39
360	1.1276e-05	7.1451e-07	5.8270e-07	2.0120e-06	1.0133e-06	1.3118e-06	0:37
361	1.1190e-05	7.0131e-07	5.7324e-07	1.9618e-06	9.8737e-07	1.2771e-06	0:38
362	1.0914e-05	6.8845e-07	5.6384e-07	1.9124e-06	9.5808e-07	1.2463e-06	0:37
363	1.0943e-05	6.7618e-07	5.5496e-07	1.8649e-06	9.3496e-07	1.2159e-06	0:38
364	1.0665e-05	6.6372e-07	5.4588e-07	1.8177e-06	9.0772e-07	1.1846e-06	0:39
365	1.0554e-05	6.5126e-07	5.3742e-07	1.7723e-06	8.8598e-07	1.1546e-06	0:37
366	1.0339e-05	6.3909e-07	5.2894e-07	1.7277e-06	8.6078e-07	1.1276e-06	0:38
367	1.0362e-05	6.2711e-07	5.2101e-07	1.6850e-06	8.4185e-07	1.1020e-06	0:37
368	1.0095e-05	6.1551e-07	5.1280e-07	1.6425e-06	8.1812e-07	1.0741e-06	0:37
369	1.0031e-05	6.0389e-07	5.0507e-07	1.6014e-06	8.0052e-07	1.0499e-06	0:36
370	solution is converged						
370	9.7726e-06	5.9243e-07	4.9710e-07	1.5610e-06	7.7860e-07	1.0262e-06	0:37

Gambar 4.4 Iterasi

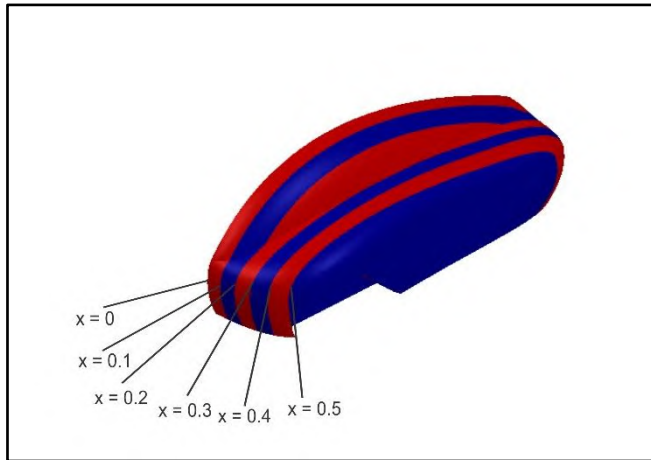
#### 4.3 Analisa Medan Aliran 3 Dimensi pada Mobil *Nogogeni*

Deskripsi skematik tentang terbentuknya separasi 3D dijelaskan oleh interaksi lapis batas pada *sidebody surface* yang berkontraksi ke arah *midspan* dan mempengaruhi karakteristik aliran pada *midspan*. Kronologi separasi 3D pada daerah interaksi ini bermula saat lapis batas pada *sidebody surface* berlaku sebagai disturbance dan menyebabkan terbentuknya vortisitas sekunder yang memunculkan aliran sekunder pada zona *upperside sidebody surface* dan zona *lowerside sidebody surface*.

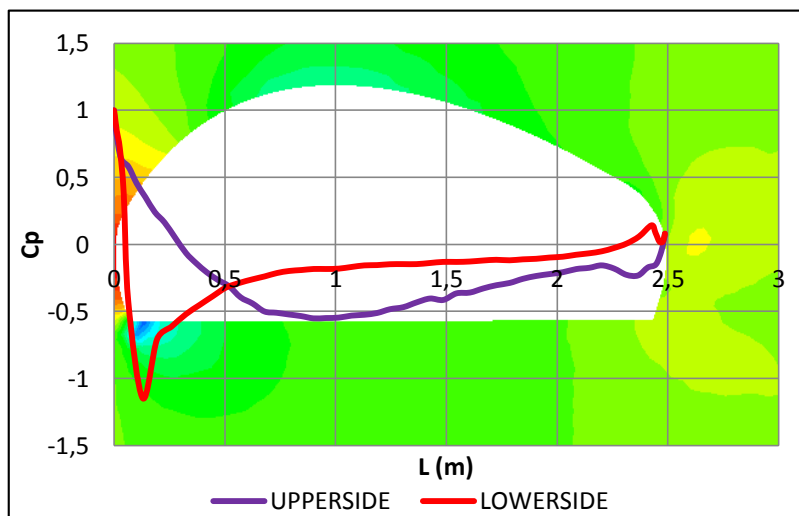


#### 4.3.1 Analisa Grafik Distribusi $C_p$

Fenomena separasi aliran pada *sidebody* dapat dijelaskan melalui data kuantitatif berupa distribusi  $C_p$  sepanjang kontur bodi.

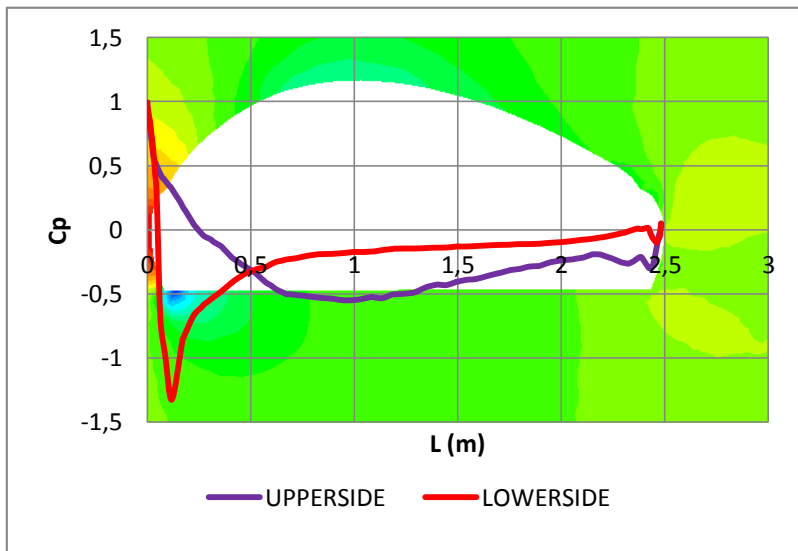


Gambar 4.5 Visualisasi potongan searah sumbu x

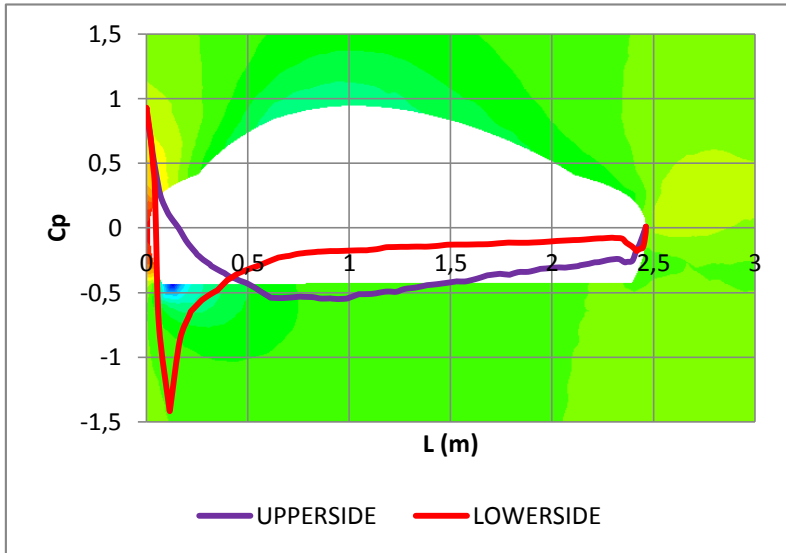


Gambar 4.6 Grafik distribusi  $C_p$  3D midspan

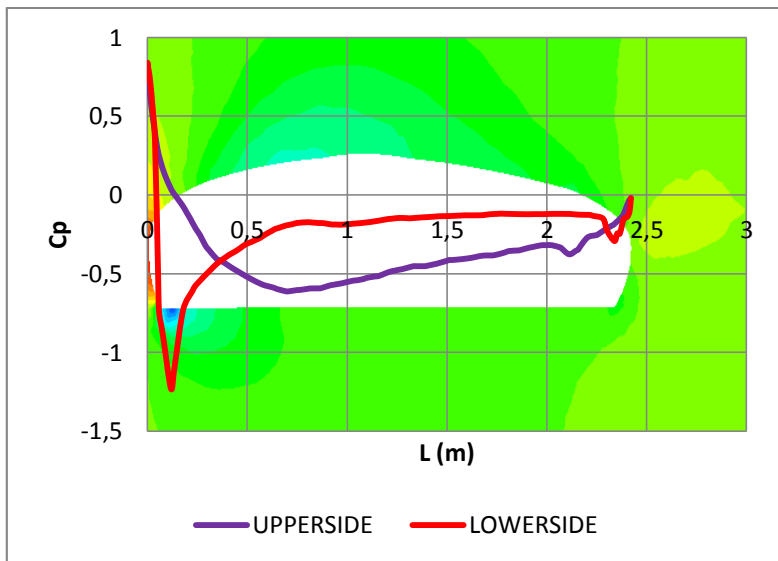
Pada grafik gambar 4.6 dapat dilihat penurunan  $C_p$  yang ekstrem pada segmen *lowerside* hal ini dikarenakan pada bagian *lowerside* memiliki perubahan kontur yang lebih tajam daripada *upper side* sehingga percepatan aliran lebih besar pada segmen *lowerside*. Pada segmen *upper side*  $C_p$  terendah terjadi pada  $L = 0.90012$  m dengan  $C_p = -0.55179$  hal ini dikarenakan kecepatan aliran mencapai nilai maksimum pada titik tersebut. Pada segmen *lowerside*  $C_p$  terendah terjadi pada  $L = 0.12921$  m dengan nilai  $C_p = -1.14761$  hal ini dikarenakan aliran mencapai kecepatan maksimum pada titik tersebut dan momentum dari aliran tidak mampu menjaga aliran agar tetap dalam kontur karena perubahan kontur yang tajam yang mengakibatkan terjadinya *bubble separation*. Sesaat setelah melewati perubahan kontur yang tajam aliran kembali mengikuti kontur bodi karena telah mendapatkan transfer momentum dari *freestream*. Pada midspan aliran mulai mengalami separasi pada  $L = 2.20145$  m dengan  $C_p = -0.15657$  pada *upper side*, dan pada  $L = 2.42662$  m dengan  $C_p = 0.142295$ .



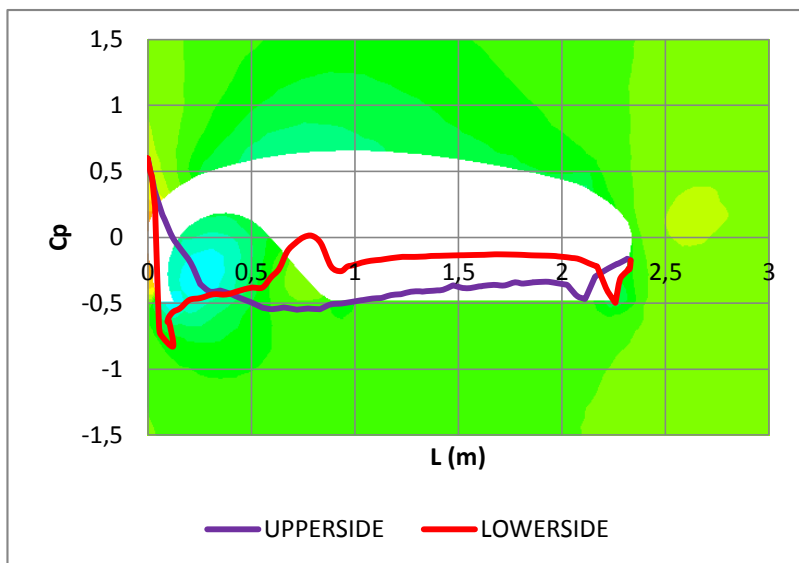
Gambar 4.7 Grafik Distribusi  $C_p$  3D pada  $x = 0.1$  m



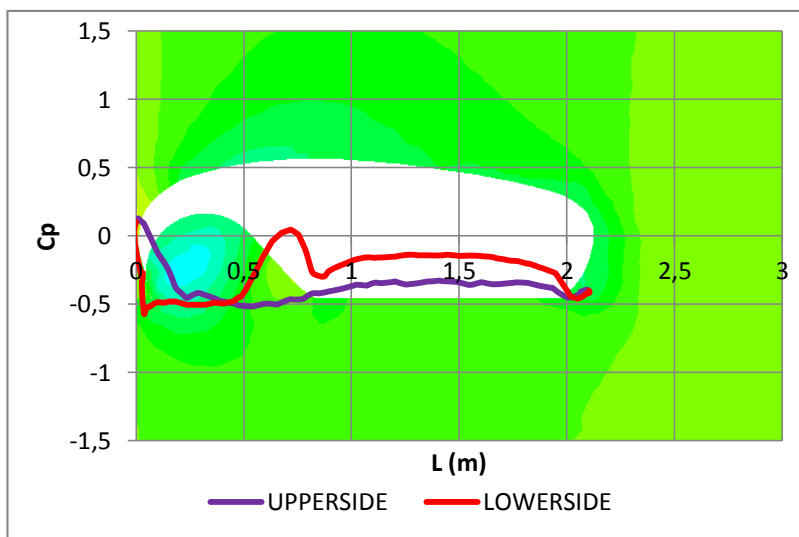
Gambar 4.8 Grafik Distribusi  $C_p$  3D pada  $x = 0.2$  m



Gambar 4.9 Grafik Distribusi  $C_p$  3D pada  $x = 0.3$  m



Gambar 4.10 Grafik Distribusi  $C_p$  3D pada  $x = 0.4$  m



Gambar 4.11 Grafik Distribusi  $C_p$  3D pada  $x = 0.5$  m

Percepatan aliran di bagian *lowerside* lebih besar daripada di bagian *upperside* karena perubahan kontur di bagian *lowerside*. Besar  $C_p$  di potongan selain pada *midspan* bernilai kurang dari 1, karena pada potongan lain aliran lebih terdefleksi ke arah *sidebody*.

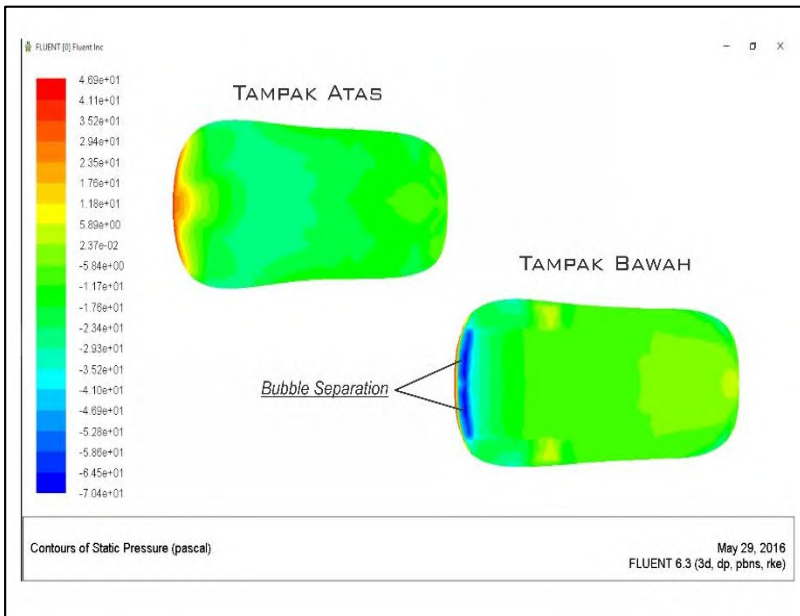
Ada dua jenis peristiwa *separation*, yaitu *bubble separation* dan *massive separation*. *Bubble separation* terjadi pada setiap akhir dari *diffusor* depan, mencapai nilai  $C_p$  terendah pada *lowerside* adaah pada gambar 4.8 pada  $L = 0.11467$  m dengan nilai  $C_p = -1.41796$  hal ini dikarenakan udara yang mengalir menuju pada bagian *midspan* didefleksikan menuju pada potongan  $x = 0.1$  dan  $x = 0.2$ . Pada bagian potongan  $x = 0.3$ ,  $x = 0.4$  dan  $x = 0.5$  nilai  $C_p$  di bagian terjadinya peristiwa *bubble separation* tidak terlalu rendah karena sebagian besar aliran terdefleksikan menuju *sidebody*. Untuk nilai  $C_p$  terendah pada *upperside body* adalah pada gambar 4.9 yaitu pada  $L = 0.70512$  m dan  $C_p = -0.61228$ . Setelah mengalami *bubble separation* aliran mengalami perlambatan, hal itu ditandai dengan kenaikan nilai  $C_p$ .

Pada bodi bagian belakang terjadi *massive separation*, hal itu ditandai dengan adanya turunnya nilai  $C_p$  setelah mengalami kenaikan. Hal itu disebabkan karena aliran sudah kehilangan momentum untuk mengikuti kontur bodi. Akhirnya, akibat dari terjadinya separasi tersebut timbulah daerah wake yang menjadi salah satu faktor naiknya harga  $C_d$ . Pada bodi *Nogogeni* daerah wake terbentuk secara simetri pada bagian kanan dan kiri mobil, daerah wake terbesar terbentuk pada potongan  $x = 0.4$  saat aliran melewati tempat roda depan dan pada daerah tersebut aliran berbentuk *vortex* pada  $L = 0.49431$  m dengan  $C_p = -0.49063$  pada bagian *upperside*, sedangkan pada bagian *lowerside* pada  $L = 0.05385$  m dengan  $C_p = -0.66399$ . Untuk *wake* yang terjadi pada bagian belakang bodi yang paling besar adalah pada potongan  $x = 0.4$ . aliran mulai mengalami separasi pada  $L = 2.04039$  m dengan  $C_p = -0.38801$  pada *upperside* dan pada  $L = 2.17052$  m dengan  $C_p = -0.22158$  pada *lowerside*..

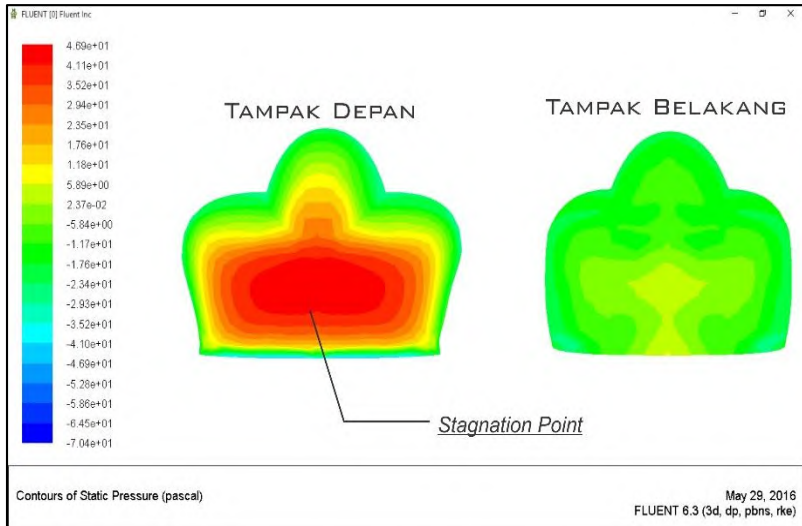
Pada grafik gambar 4.10 dan 4.11 terjadi kenaikan tekanan yang drastis hal ini dikarenakan aliran mengalami perlambatan akibat terbentur kontur bodi, kontur bodi tersebut adalah lubang tempat roda depan yang berbentuk sedemikian rupa. Ketika aliran mengalami perlambatan maka tekanannya akan naik.

### 4.3.2 Visualisasi Kontur Tekanan

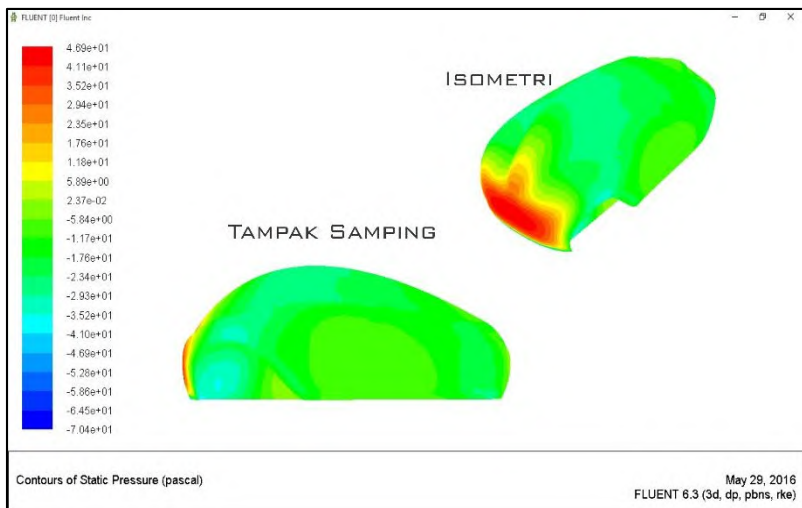
Untuk mendukung data kuantitatif pada grafik distribusi *Pressure Coefficient* ( $C_p$ ), karakteristik aliran di sekitar *midspan* yang mendapat pengaruh dari efek *sidebody* juga dapat dijelaskan secara kualitatif melalui visualisasi tekanan pada bodi *Nogogeni*. Visualisasi kontur tekanan statis ini dapat digunakan untuk mengetahui tekanan statis pada keseluruhan bodi dan untuk mengetahui peristiwa yang tidak tertangkap pada grafik distribusi  $C_p$  di atas. Visualisasi kontur tekanan statis pada bodi *Nogogeni* adalah sebagai berikut.



Gambar 4.12 Kontur Tekanan Statis Tampak Atas dan Tampak Bawah



Gambar 4.13 Kontur Tekanan Statis Tampak Depan dan Tampak Belakang



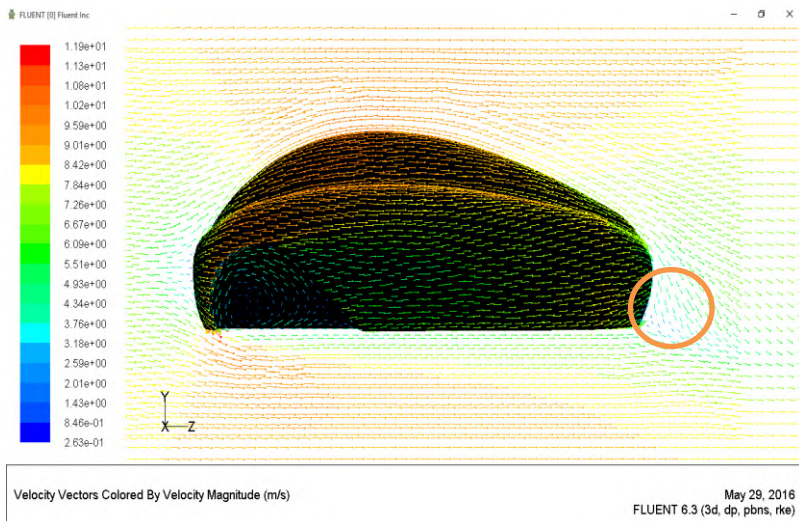
Gambar 4.14 Kontur Tekanan Statis Tampak Samping dan Isometri

Banyak peristiwa yang tidak dapat diketahui dengan potongan arah sumbu x dan distribusi  $C_p$ -nya. Karena itu visualisasi kontur ini sangat penting.

Peristiwa *bubble separation* sangat jelas terlihat terjadi pada bagian bawah bodi mobil *Nogogeni* dapat dilihat pada gambar 4.12 dengan nilai tekanan statis -70.4 Pa (gage) pada bagian bawah, dan terjadi separasi juga dengan tekanan statis sebesar -35.2 Pa (gage) pada atas bodi. Daerah stagnasi juga terlihat sangat jelas dapat kita lihat pada gambar 4.13 dengan nilai tekanan statis sebesar 46.9 Pa (gage). Tempat roda bagian depan terlihat pada gambar 4.14 dengan nilai tekanan statis sebesar -41 Pa (gage) dari tekanan statis tersebut bisa kita ketahui besar kecepatan aliran yang mengalir masuk ke tempat roda yang akan kita bahas pada bahasan analisa selanjutnya.

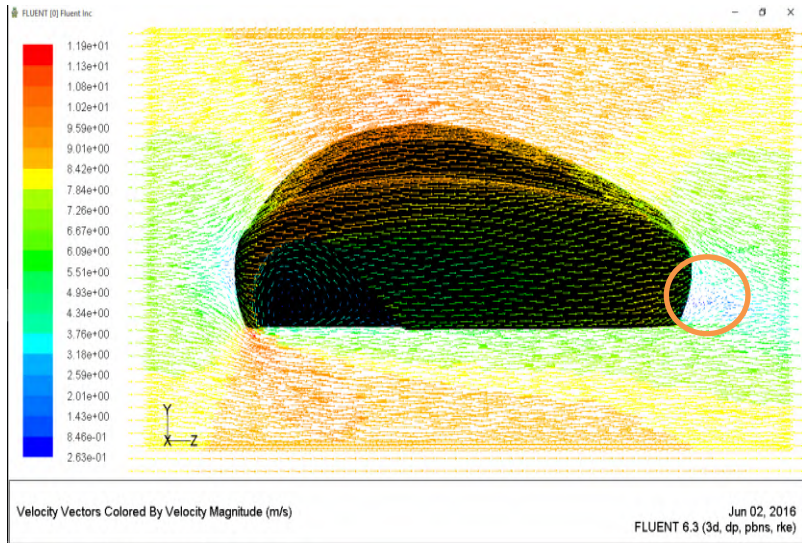
### 4.3.3 Visualisasi Vektor Kecepatan

Daerah *wake* tidak dapat diketahui dengan jelas dalam visualisasi ini karena tidak diketahui arah vector kecepatannya, untuk mendukung visualisasi di atas agar daerah wake tampak jelas maka dicantumkan visualisasi vektor kecepatan sebagai berikut.

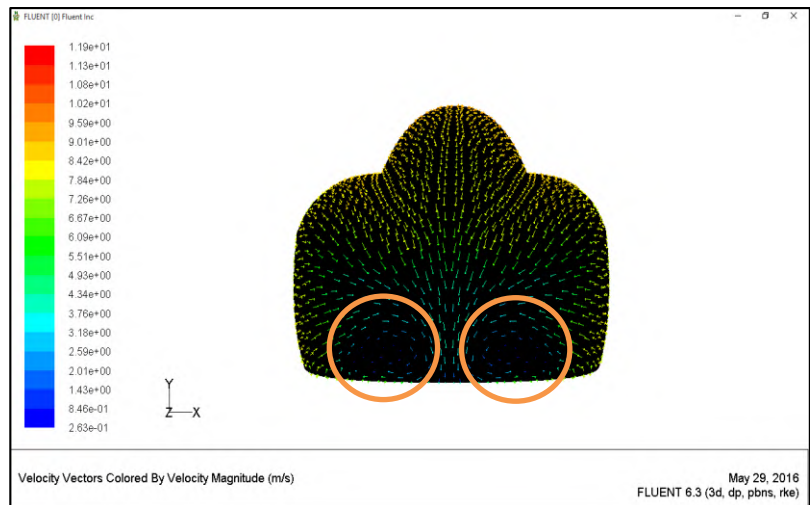


Gambar 4.15 Vektor kecepatan pada *midspan*





Gambar 4.16 Vektor kecepatan pada  $x = 0.2$  m



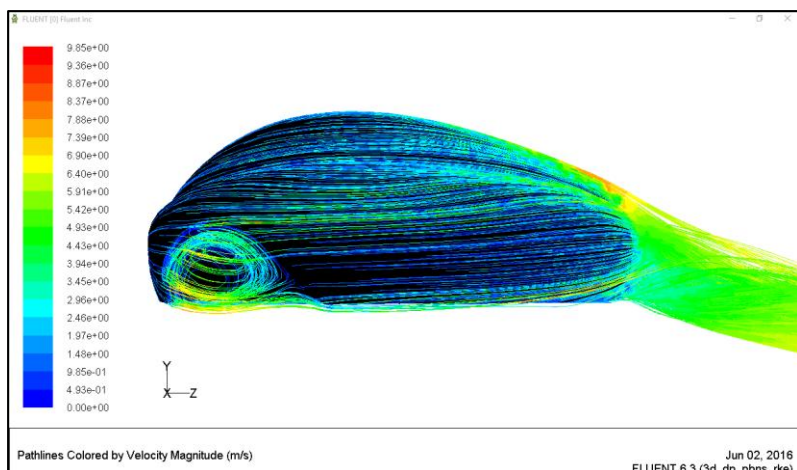
Gambar 4.17 Vektor kecepatan pada  $z = 2.5$  m

Dari gambar 4.15 dapat diketahui daerah *wake* pada *midspan*. Daerah *wake* pada potongan  $x = 0.2$  m lebih besar daripada di *midspan* hal ini dikarenakan sebagian besar aliran terdefleksi ke arah *sidebody*. Untuk memperjelas daerah *wake* ditampilkan visualisasi vector kecepatan pada  $z = 2.5$  yang merupakan bagian belakan bodi *Nogogeni* dapat terlihat jelas bahwa daerah *wake* terjadi secara simetri di bagian kiri dan kanan bodi dan daerah terbesar berada di bagian  $x = 0.2$  baik di bagian kanan dan kiri bodi *Nogogeni*. Arah vektor kecepatan *wake* tidak hanya mengarah searah dengan aliran *freestream* tapi juga tegak lurus dengan arah aliran *freestream*, dapat dilihat pada gambar 4.16, aliran membentuk *vortex* yang tegak lurus terhadap arah aliran *freestream* pada bagian roda dan belakang bodi mobil.

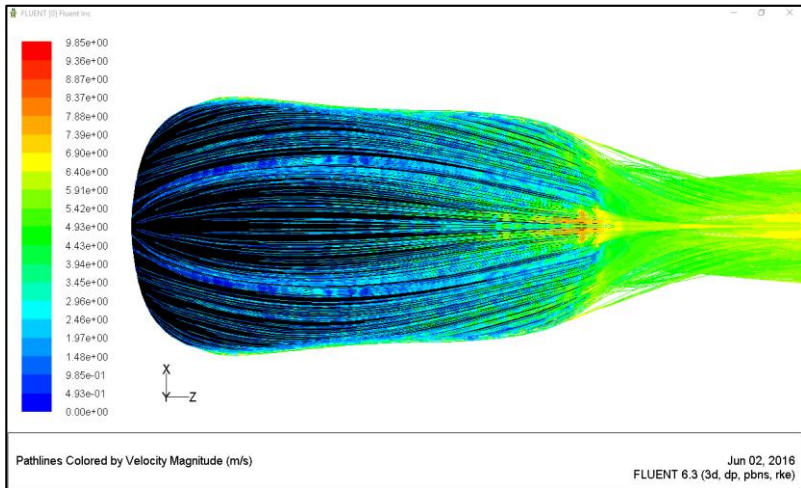
Aliran sebagian besar terdefleksi ke arah *sidebody*, arah vektor kecepatan yang membentuk *vortex* pada daerah *wake* tidak hanya tegak lurus terhadap aliran *freestream* tapi juga searah dengan arah aliran *freestream* yang searah sumbu  $z$ .

#### 4.3.4 Visualisasi *Pathline* Kecepatan

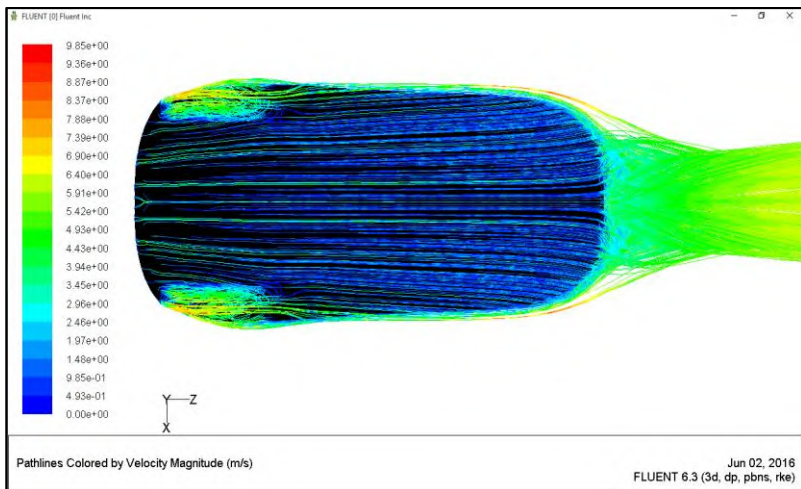
Untuk mengetahui peristiwa aliran pada *sidebody*, akan ditampilkan visualisasi *pathline* aliran yang melintasi bodi *Nogogeni* sebagai berikut.



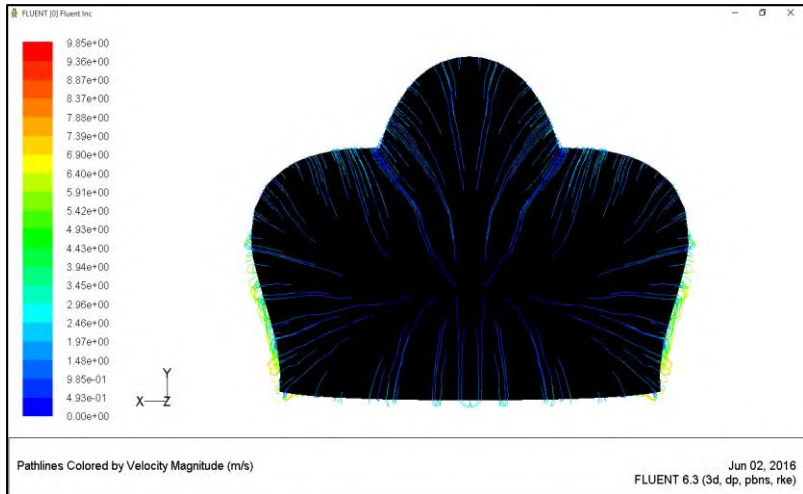
Gambar 4.18 *Pathline* Aliran Tampak Sampling



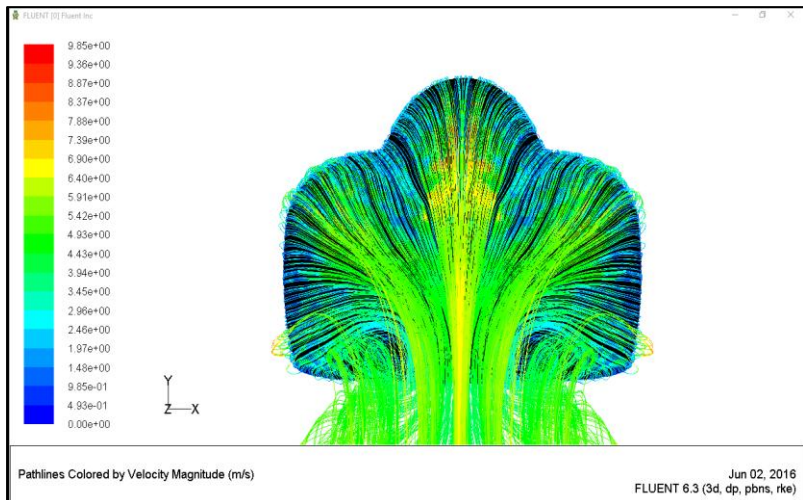
Gambar 4.19 *Pathline* Aliran Tampak Atas



Gambar 4.20 *Pathline* Aliran Tampak Bawah



Gambar 4.21 *Pathline* Aliran Tampak Depan



Gambar 4.22 *Pathline* Tampak Belakang

## 4.4 Analisa Gaya Aerodinamika

Analisa mengenai data kuantitatif diperlukan untuk menunjang dan sekaligus menyimpulkan argumentasi mengenai fenomena yang terobservasi pada data kualitatif. Konsep perhitungan gaya-gaya aerodinamika pada model uji seperti gaya hambat (*drag*) dan gaya angkat (*lift*), akan dibahas lebih lanjut baik melalui pemodelan 3D pada daerah *midspan* dan *sidebody center*.

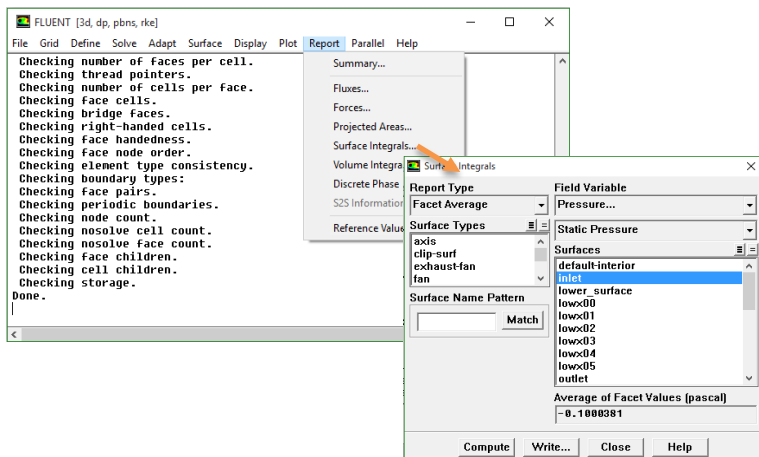
### 4.4.1 Perhitungan Gaya Drag

Gaya *drag* yang dihasilkan oleh *mobil Nogogeni* dapat diketahui berdasarkan hasil analisis numerik 3D di *software Fluent* 6.3.26. Adapun beberapa cara untuk mendapatkan data harga koefisien *drag* pada kendaraan *mobil Nogogeni* adalah sebagai berikut:

#### 1. Reference Value

Sebelum menentukan gaya drag maupun gaya lift perlu adanya data referensi dalam perhitungan gaya aerodinamika yang terjadi, yaitu dengan cara pengambilan data ulang dari hasil iterasi awal yang telah dilakukan.

Setelah proses iterasi *convergence*, kemudian pilih *report* > *surface integrals* seperti pada gambar berikut.



Gambar 4.23 *Surface integrals*

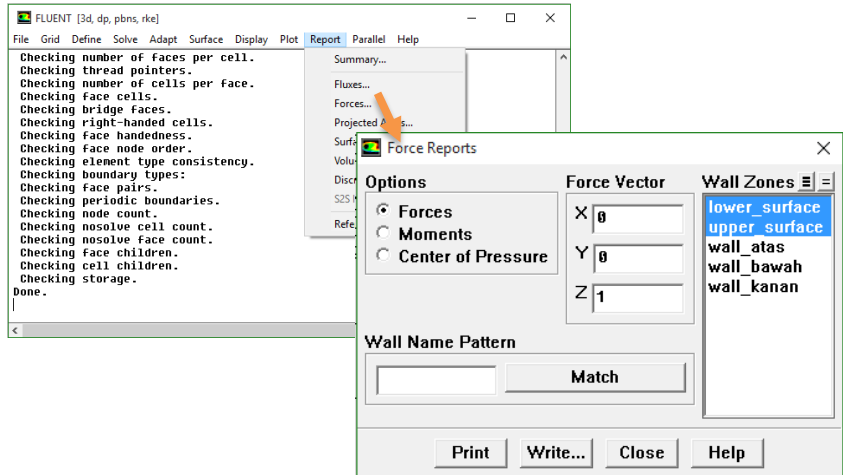
Kemudian pilih *reference values* > *compute from* pilih *inlet*, kemudian isi kolom *Area* sesuai luas frontal body mobil *Nogogeni* dan *Pressure* sesuai yang telah dihitung pada *surface integrals* seperti pada gambar berikut.

Reference Values	
Compute From	inlet
Reference Values	
Area (m2)	0.934
Density (kg/m3)	1.225
Enthalpy (J/kg)	0
Length (m)	1
Pressure (pascal)	-0.1000381
Temperature (K)	288.16
Velocity (m/s)	8.3
Viscosity (kg/m-s)	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4
Reference Zone	
	udara
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Help"/>	

Gambar 4.24 *Reference Values*

## 2. Report Force

Dalam menentukan gaya drag, ada beberapa hal yang harus diperhatikan yaitu perbedaan tekanan (dalam hal ini berdasarkan *inlet* dan *outlet*) dan gesekan yang ditimbulkan akibat fluida *viscous*. Untuk mengetahui besar gaya yang terjadi setelah mengatur nilai pada *reference value* lalu *report* > *forces* lalu muncul kotak dialog *force report* lalu klik *print* seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.25 *Force report* pada *Fluent* 6.3.26

Lalu didapat hasil *Cd* sebagai berikut :

Force vector: (0 0 1)

zone name	pressure force n	viscous force n	total force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
lower_surface	6.2889469	0.35414456	6.6430915	0.15957643	0.0089861028	0.16856253
upper_surface	4.4320268	0.4809621	4.9129889	0.11245873	0.012283985	0.12466272
net	10.720974	0.83510664	11.55608	0.27203516	0.02119000	0.29322525

Gaya Drag

→

Koefisien Drag

→

Gambar 4.26 Hasil *drag force report* pada *Fluent* 6.3.26

Gaya *drag* yang dihasilkan oleh suatu kendaraan dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain *density*, kecepatan udara yang melintasi kendaraan, luas frontal dan koefisien *drag*. Hal ini sesuai dengan persamaan berikut ini:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_f}$$

Dimana :

- $F_D$  = Gaya *drag* (kg.m/s<sup>2</sup>)
- $V$  = Kecepatan aliran udara bebas (m/s)
- $A_f$  = Luas frontal (m<sup>2</sup>)
- $\rho$  = Densitas 1.2250 (kg/ m<sup>3</sup>)

ContohPerhitungan $C_D$ :

$$C_D = \frac{11.55608}{\frac{1}{2} \times 1.225 \times 8.3^2 \times 0.934}$$

$$C_D = \frac{11.55608}{39.4102467}$$

$$C_D = 0.29322525$$

Setiap kendaraan diharapkan mempunyai koefisien *drag* yang rendah karena mempengaruhi besar kecilnya gaya *drag* yang diterima oleh kendaraan.

#### 4.4.2 Perhitungan Gaya *Lift*

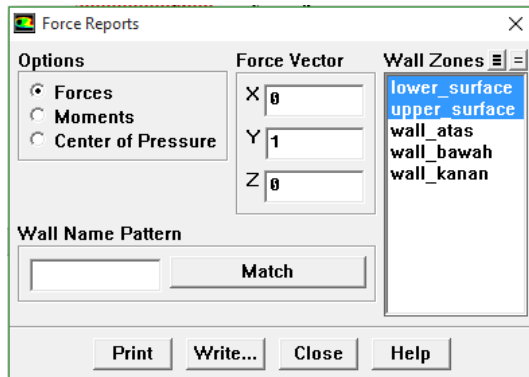
Gaya *Lift* yang dihasilkan oleh mobil *urban Nogogeni* dapat diketahui berdasarkan hasil analisis numerik 3D di *software Fluent 6.3.26*. Adapun beberapa cara yang digunakan hamper sama dengan cara yang digunakan untuk mendapat  $C_d$  adalah sebagai berikut:



## 1. Report Force

Dalam menentukan gaya *lift*, ada beberapa hal yang harus diperhatikan yaitu perbedaan tekanan (dalam hal ini berdasarkan *upper* dan *lower*) dan gesekan yang ditimbulkan akibat fluida *viscous*.

Untuk mengetahui besar gaya yang terjadi setelah mengatur nilai pada *reference value* lalu *report > forces* lalu muncul kotak dialog *force report* lalu klik *print* seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.27 *force report* pada *Fluent.6.3.26*

Lalu didapat hasil  $C_l$  sebagai berikut :

Force vector: (0 1 0)

zone name	pressure force n	viscous force n	total force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
lower_surface	-15.239868	-0.01317523	-15.253044	-0.38669809	-0.00033430972	-0.3870324
upper_surface	22.166543	0.03949075	22.206034	0.5624563	0.0010020426	0.56345834
net	6.926675	0.026315521	6.9529905	0.17575821	0.00066773291	0.17642594

Gaya Lift

Koefisien Lift

Gambar 4.28 Hasil *lift force report* pada *Fluent.6.3.26*

Gaya *lift* yang dihasilkan oleh suatu kendaraan dipengaruhi oleh beberapa factor antara lain: *density*, kecepatan udara yang melintasi kendaraan, luas frontal dan koefisien lift. Hal ini sesuai dengan persamaan berikut ini:

$$C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot A_f}$$

Dimana :

- $F_l$  = Gaya lift (kg.m/s<sup>2</sup>)
- $V$  = Kecepatan aliran udara bebas (m/s)
- $A_f$  = Luas frontal (m<sup>2</sup>)
- $\rho$  = Densitas 1.2250 (kg/ m<sup>3</sup>)

Contoh Perhitungan  $C_l$ :

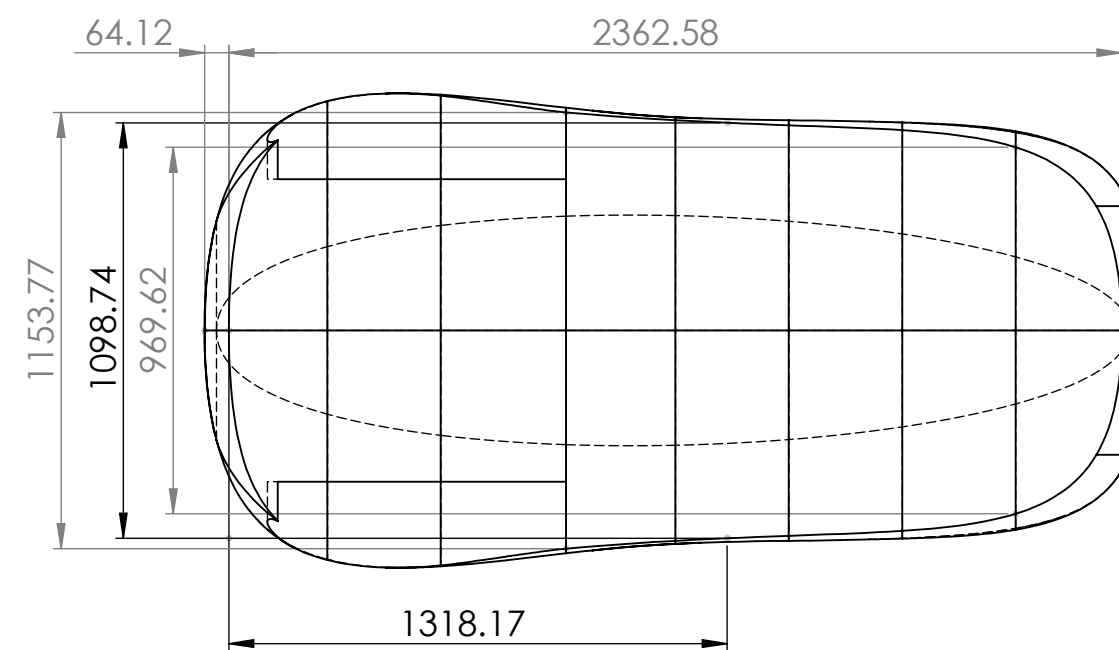
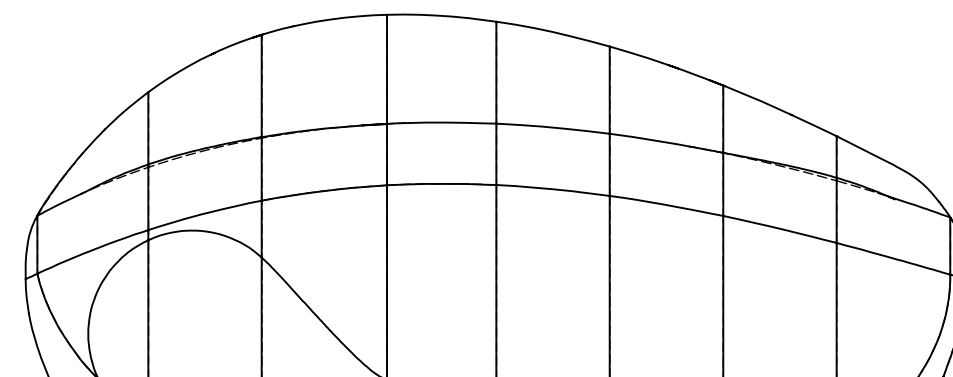
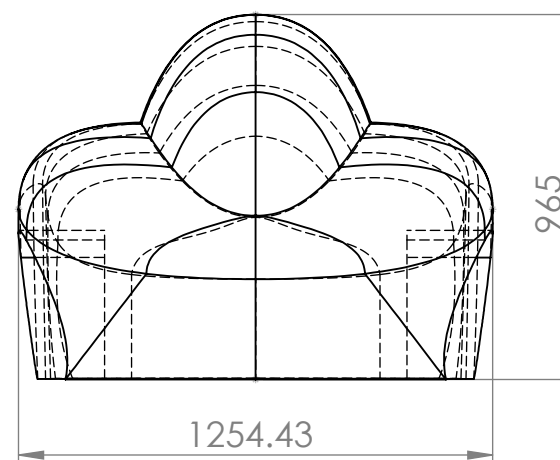
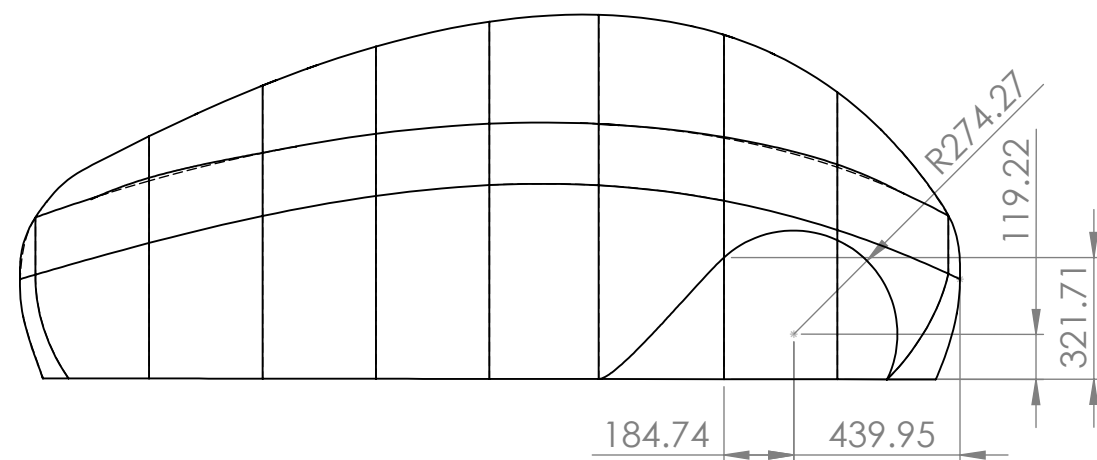
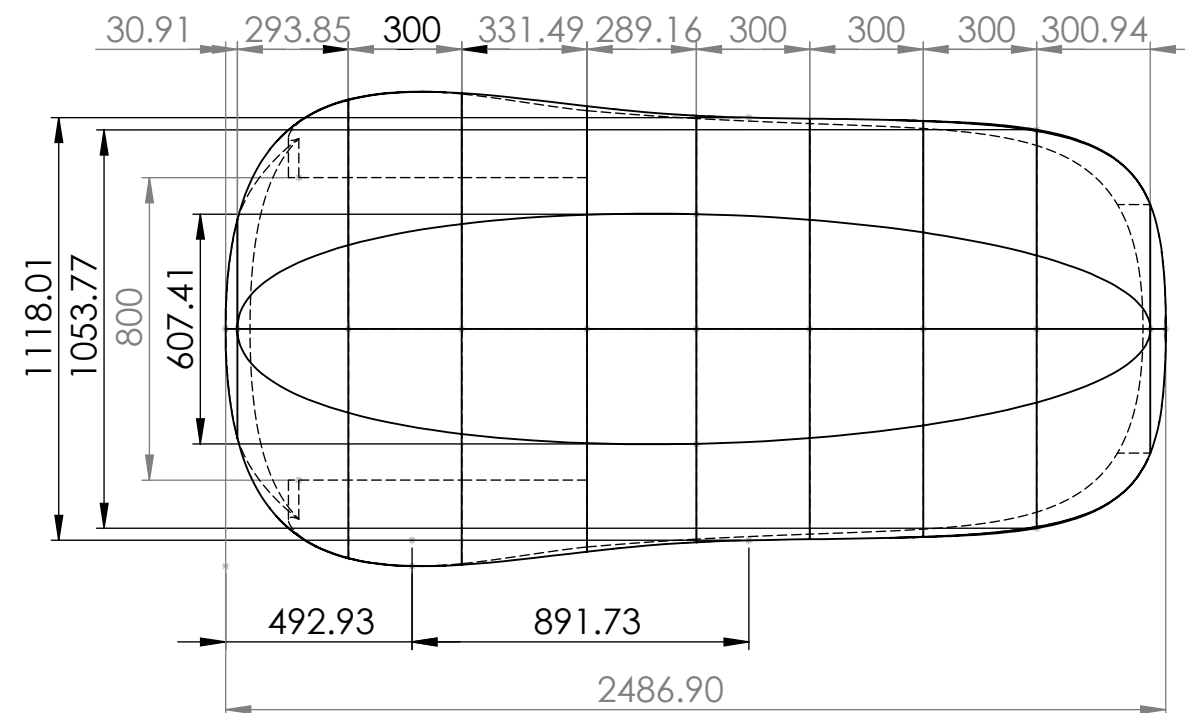
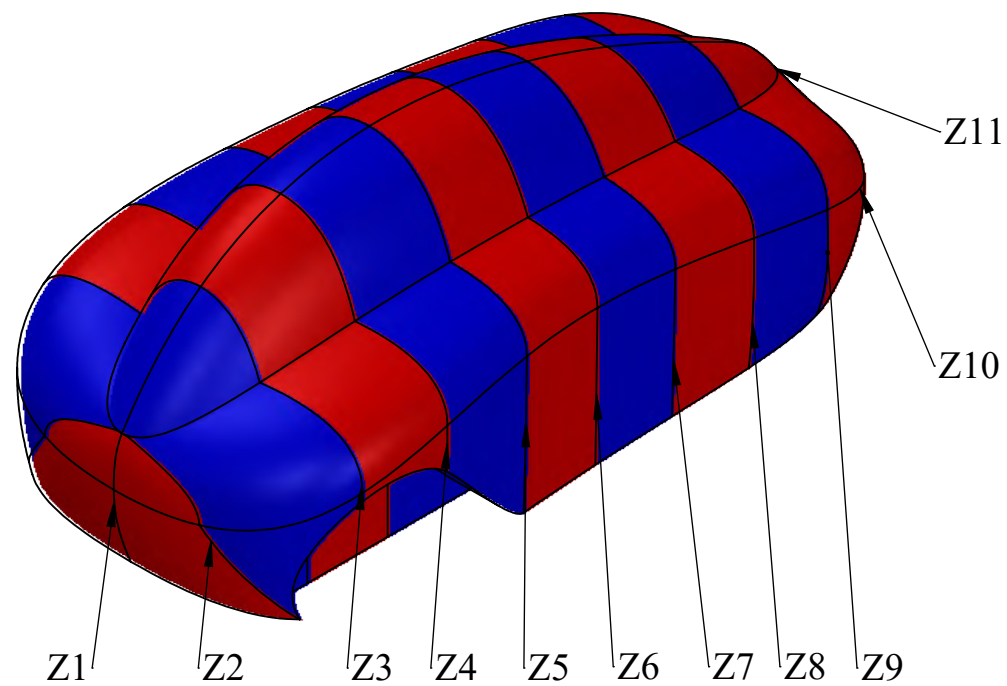
$$C_l = \frac{6.9529905}{\frac{1}{2} \times 1.225 \times 8.3^2 \times 0.934}$$


$$C_L = \frac{6.9529905}{39.4102467}$$

$$C_L = 0.17642594$$

Setiap kendaraan diharapkan mempunyai koefisien *lift* yang rendah karena mempengaruhi besar kecilnya gaya *lift* yang diterima oleh kendaraan.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



	SKALA : 1 : 20	NAMA : ACHMAD CHOIRUL A.	KETERANGAN		
	UKURAN : mm	NRP : 2113030037			
	TANGGAL: 29-06-16	DILIHAT : DEDY Z.N, ST, MT, PhD			
D3 TEKNIK MESIN		MODEL BODI NOGOGENI		NO.01	A3

Lampiran 2

Tabel Koordinat Titik Geometri Bodi Mobil Nogogeni

POSISI	KOORDINAT		
	X	Y	Z
Z1	0,0	0,466066	-2,689,660
	0,0	0,200853	-2,625,616
Z2	-0,503255	0,201014	-2,496,569
	-0,289043	0,480506	-2,658,818
	0,0	0,633791	-2,658,818
	0,289043	0,480506	-2,658,818
	0,503255	0,201014	-2,496,569
	-0,4	0,201014	-2,496,569
	0,4	0,201014	-2,496,569
	0,0	0,201178	-2,364,973
Z3	-0,4	0,201178	-2,364,973
	-0,4	0,569417	-2,364,973
	-0,606803	0,569417	-2,364,973
	-0,605756	0,595987	-2,364,973
	-0,221675	0,761696	-2,364,973
	0,0	0,960935	-2,364,973
	0,221675	0,761696	-2,364,973
	0,605756	0,595987	-2,364,973
	0,606803	0,569417	-2,364,973
	0,4	0,569417	-2,364,973
	0,4	0,201178	-2,364,973
	0,0	0,201553	-2,064,973
Z4	-0,4	0,201553	-2,064,973
	-0,4	0,523266	-2,064,973
	-0,621111	0,523266	-2,064,973

	-0,623645	0,673419	-2,064,973
	-0,277613	0,838842	-2,064973
	0,0	1,112,468	-2,064,973
	0,277613	0,838842	-2,064,973
	0,623645	0,673419	-2,064,973
	0,621111	0,523266	-2,064,973
	0,4	0,523266	-2,064,973
	0,4	0,201553	-2,064,973
Z5	0,0	0,201966	-1,733,483
	-0,4	0,201966	-1,733,483
	-0,576887	0,201966	-1,733,483
	-0,589142	0,714105	-1,733,483
	-0,302170	0,876709	-1,733,483
	0,0	1,165,302	-1,733,483
	0,302170	0,876709	-1,733,483
	0,589142	0,714105	-1,733,483
	0,576887	0,201966	-1,733,483
	0,4	0,201966	-1,733,483
Z6	0,0	0,202327	-1,444,327
	-0,556182	0,202327	-1,444,327
	-0,564104	0,714810	-1,444,327
	-0,303705	0,877145	-1,444,327
	0,0	1,146,941	-1,444,327
	0,303705	0,877145	-1,444,327
	0,564104	0,714810	-1,444,327
	0,556182	0,202327	-1,444,327
Z7	0,0	0,202702	-1,144,327
	-0,542903	0,202702	-1,144,327
	-0,556222	0,686123	-1,144,327
	-0,288660	0,850534	-1,144,327
	0,0	1,081,392	-1,144,327

	0,288660	0,850534	-1,144,327
	0,556222	0,686123	-1,144,327
	0,542903	0,202702	-1,144,327
Z8	0,0	0,203076	-0,844327
	-0,529922	0,203076	-0,844327
	-549798	0,633089	-0,844327
	-0,255170	0,799491	-0,844327
	0,0	0,978195	-0,844327
	0,255170	0,799491	-0,844327
	549798	0,633089	-0,844327
	0,529922	0,203076	-0,844327
Z9	0,0	0,203450	-0,544327
	-0,484810	0,203450	-0,544327
	-0,523297	0,561788	-0,544327
	-0,194421	0,725778	-0,544327
	0,0	0,843969	-0,544327
	0,194421	0,725778	-0,544327
	0,523297	0,561788	-0,544327
	0,484810	0,203450	-0,544327
Z10	0,328651	0,203717	-0,330677
	0,328651	0,477983	-0,243383
	0,0	0,629318	-0,243383
	-0,328651	0,477983	-0,243383
	-0,328651	0,203717	-0,330677
Z11	0,0	0,466066	-0,202837
	0,0	0,203801	-0,263037

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil analisa aliran melintasi bodi mobil *Nogogeni* menggunakan pemodelan numerik *software Fluent 6.3.26*, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. *Interval mesh* didapatkan 0.06 setelah melalui beberapa percobaan.
2. Didapatkan jumlah *iterasi* 370 dan *running time* 1 jam sampai dengan 2 jam.
3. Dari grafik  $C_p$  tampak bahwa separasi pada daerah *upperside* bermula pada  $L = 2.04039$  m dan pada *lowerside* pada  $L = 2.17052$  m.
4. *Coefficient drag* ( $C_D$ ) yang diperoleh saat simulasi pada bodi mobil *Nogogeni* bernilai 0.29322525
5. *Coefficient lift* ( $C_L$ ) yang diperoleh saat simulasi pada bodi mobil *Nogogeni* bernilai 0.17642594
6. Mobil *Nogogeni* ini memiliki nilai  $C_D$  yang lebih kecil daripada mobil *Nogogeni 3*, dan memiliki  $C_L$  yang lebih besar dari *Nogogeni 3*.

#### **5.2 Saran**

Adapun beberapa saran pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Pada pembuatan model Gambit diharapkan titik pusat mobil bagian *leading edge* berada pada titik x,y (0,0) untuk memudahkan pembacaan pada grafik  $C_p$  vs  $L$ .
2. Pada analisa model uji 3D dirasa kurang akurat dalam analisa bodi mobil, karena *interval meshing* kurang rapat. Diharapkan untuk membuat *interval meshing* yang lebih kecil pada penelitian selanjutnya dengan modifikasi bentuk geometri agar bisa sesuai ketika dilakukan proses *meshing*.
3. Pada analisa 3D yang akan datang hendaknya juga mempertimbangkan modifikasi bentuk bodi yang mempengaruhi nilai  $C_L$  pada aliran yang melintasi bodi



melalui pendekatan  $C_p$  pada kondisi stagnasi, karena kenaikan  $C_L$  ini juga akan mempengaruhi kestabilan mobil saat melaju terutama saat pada tikungan atau belokan.

## DAFTAR PUSTAKA

Anderson John D. JR. 1988. *Fundamentals of aerodynamics*: International Edition. Singapore: McGraw-hill Book Co.

Bao, F., and Dallmann, Uwe Ch., (2004), "Some physical aspects of separation bubble on a rounded backward-facing step", *Aerospace Science and Technology*, Vol. 8, 83-91

Barnard R.H. 1996. *Road vehicle Aerodynamic design*: An Introduction. England: Longman.

Damjanović, Darko, Kozak, Dražan, Ivandić, Željko, and Kokanović, Mato. *Car Design As A New Conceptual And CFD Analysis In Purpose of Improving Aerodynamics*. 2010. Croatia

Hucho, W.-H. 1987, "Aerodynamics of Passenger Cars," in *Aerodynamics of Road Vehicles*, Hucho, W-H ed, Butterworth and Co. Ltd, London, United

M. Olson, Reuben, Steven J. Wright. 1993. *Dasar-Dasar Mekanika Fluida Teknik* : Edisi Kelima. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama.

Mardiyanto, Ismail. 2012. *Pemodelan Medan Aliran Pada Bodi Mobil Nogogeni 5*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Nashruddin, Ahmad Haidar. 2012. *Studi Numerik Karakteristik Aliran 3 Dimensi di Sekitar Bodi Modifikasi Sapuain Urban Concept dengan Rasio Ground Clearance terhadap Panjang Model (C/L) 0,048*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Ningrum, Dwina Azizah Setya. 2013. *Studi Numerik : Modifikasi Bodi Mobil Listrik Pancasona Guna Mereduksi Gaya Drag*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Pritchard, Philip J., Fox and McDonald's. 2011. *Introduction of fluid mechanics: Eight edition*. USA: John Wiley & Sons, Inc.

Saputra, I Putu A. 2012. Studi Numerik Karakteristik Aliran (2D) Melintasi Bodi Mobil GEA Kondisi *Centerline*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Sutantra, I Nyoman. 2001. Teknologi Otomotif: Teori dan Aplikasinya. Surabaya: Guna Widya.

Tuakia, Firman. 2008. Dasar-Dasar CFD Menggunakan FLUENT. Bandung: Informatika.

Yahya, Iffan. 2015. Pemodelan Medan Aliran 3 Dimensi Pada Bodi Mobil Urban Nogogeni 3. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Blora, 10 Juli 1995, merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu, SDN 4 Karangjati Blora, SMPN 1 Blora, dan SMAN 1 Blora. Pada tahun 2013 Penulis diterima di Jurusan D3 Teknik Mesin FTI – ITS dan terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP 2113030037. Konversi Energi merupakan bidang studi yang dipilih penulis.

Selama duduk di bangku kuliah penulis aktif mengikuti kegiatan baik di bidang akademik maupun non akademik. Penulis juga pernah mengikuti berbagai kegiatan dan bergabung dalam organisasi untuk menunjang softskill. Kegiatan yang pernah diikutinya antara lain : Staff BSO IECC Badan Eksekutif Mahasiswa ITS 2014/2015, Manajer BSO IECC Badan Eksekutif Mahasiswa ITS 2015/2016.

Pelatihan yang pernah diikuti penulis : Pelatihan LKMM Pra TD di Fakultas Teknik Industri ITS (2013). Pelatihan LKMM TD, Pelatihan KTI. Penulis Juga pernah melaksanakan kerja praktek di PT. CNC Controller Indonesia selama satu bulan pada 08 Juni s/d 15 Juli 2014 pada divisi *mechanic*.